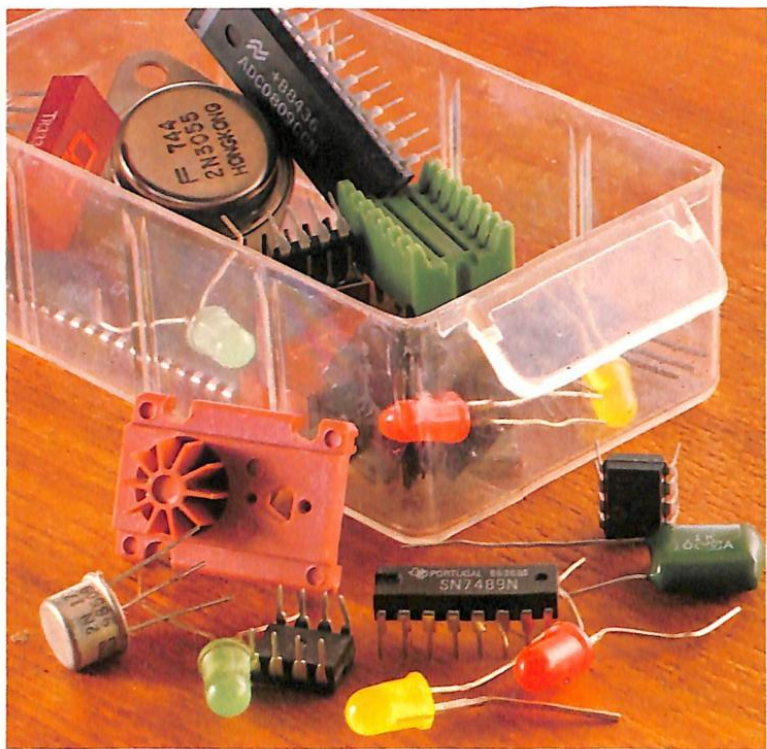
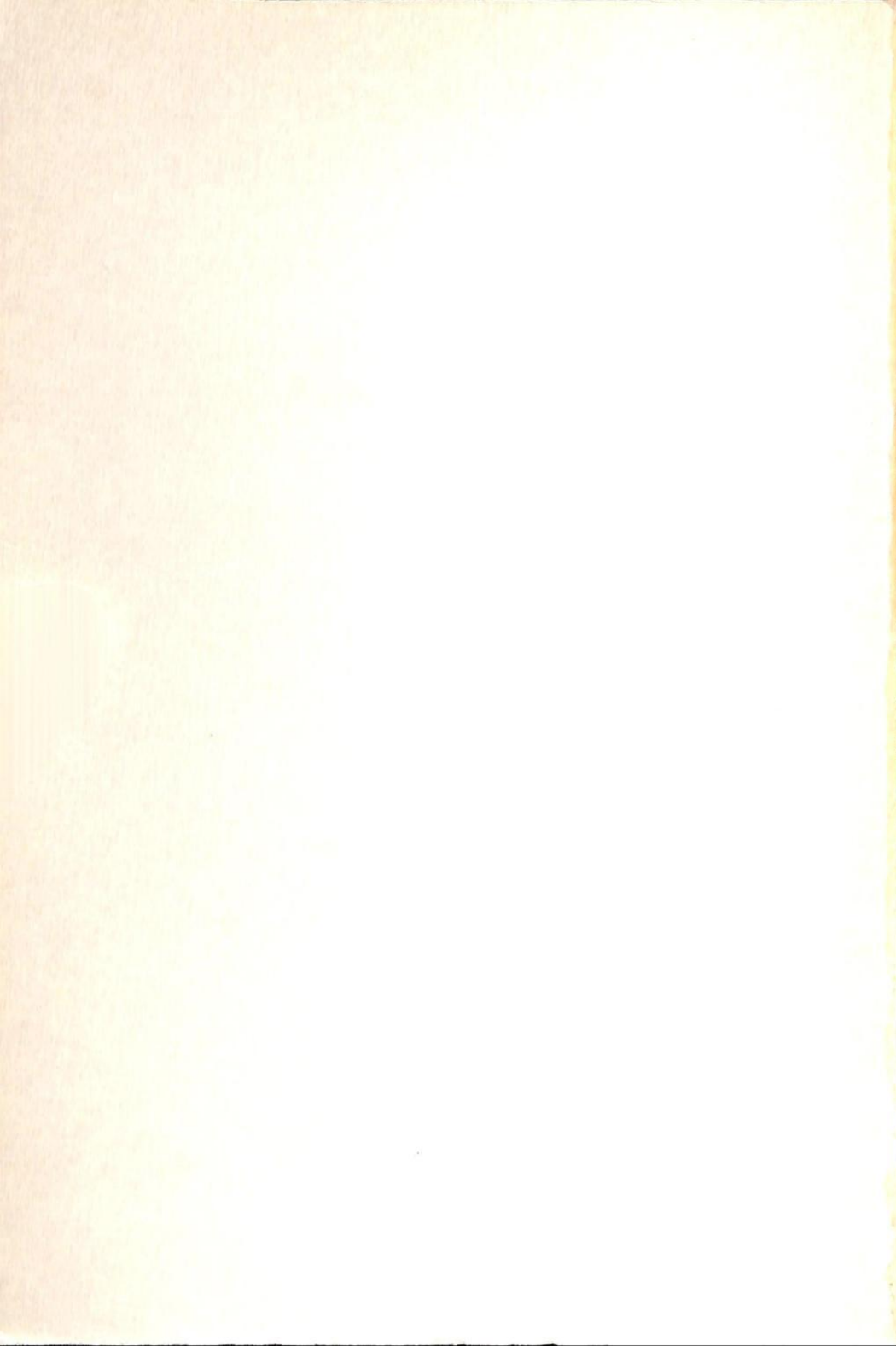


LIBRI DI BASE  
**ELETTRONICA**

# SEMICONDUTTORI



GRUPPO EDITORIALE  
**JACKSON**



*LIBRI DI BASE*  
***ELETTRONICA***

# **SEMICONDUTTORI**



GRUPPO EDITORIALE  
**JACKSON**

**Direttore responsabile :**  
Paolo Reina

**Direttore di divisione :**  
Roberto Pancaldi

**Supervisore dell'opera :**  
Fosco Bellomo

**Coordinamento editoriale :**  
Renata Rossi

**Copertina :**  
Sergio Mazzali

**Fotolito :**  
3C - Milano

**Stampa :**  
GRAFICA 85 - Rodano Millepini

**Distribuzione :**  
Sodip - Milano

Tutti i diritti di riproduzione e pubblicazione di disegni , fotografie e testi sono riservati.

© Gruppo Editoriale Jackson - 1988

Aut. alla pubblicazione n° 793 del 30/11/1987  
(autorizzazione della Direzione Provinciale delle PPTT di Milano)



# INDICE

## *Capitolo 1*

- 
- 5     Conduttori, isolanti e semiconduttori
- 

## *Capitolo 2*

- 
- 13    Il diodo semiconduttore
- 

## *Capitolo 3*

- 
- 21    Transistori bipolari
- 

## *Capitolo 4*

- 
- 39    I transistori unipolari
- 

## *Capitolo 5*

- 
- 49    Il tiristore
- 

## *Capitolo 6*

- 
- 55    Il triac
- 

## *Capitolo 7*

- 
- 63    I circuiti integrati
-

## *Capitolo 8*

---

71 Il transistor come amplificatore

---

## *Capitolo 9*

---

97 Oscillatori a transistori

---

## *Capitolo 10*

---

111 Il transistor in campo digitale

---

*CONDUTTORI, ISOLANTI E SEMICONDUTTORI*

**L**a struttura cristallina dei buoni conduttori metallici, come il rame, l'alluminio e l'argento, è tale che gli elettroni esterni sono comuni a tutti gli atomi, e si possono muovere liberamente attraverso tutto il materiale. Questo avviene per un'ampia gamma di temperature. La conduzione elettrica nasce, allora, in conseguenza del movimento di detti elettroni liberi, sottoposti all'azione del campo elettrico che viene applicato.

Contrariamente ai buoni conduttori, la struttura degli isolanti solidi è tale che, per un'ampia gamma di temperature, quasi tutti gli elettroni rimangono legati agli atomi del materiale e, pertanto, non ci saranno molte cariche che si muovono attraverso l'isolante, quando gli viene applicato un moderato campo elettrico, il che significa che non ci potrà essere una conduzione elettrica apprezzabile.

Si può affermare che, alla temperatura ambiente, i semiconduttori sono, contemporaneamente, cattivi conduttori e cattivi isolanti. A temperature molto basse si comportano come isolanti e, a temperature elevate, si trasformano in conduttori abbastanza buoni.

*I semiconduttori*

In un conduttore, la corrente è dovuta al movimento delle cariche negative (elettroni), mentre in un semiconduttore si deve al movimento sia degli elettroni, che delle cariche positive (lacune).

Inoltre, in un semiconduttore si possono inserire atomi di altri elementi, detti impurezze, in modo che la corrente si debba principalmente agli elettroni o alle lacune, in funzione dell'impurezza introdotta.



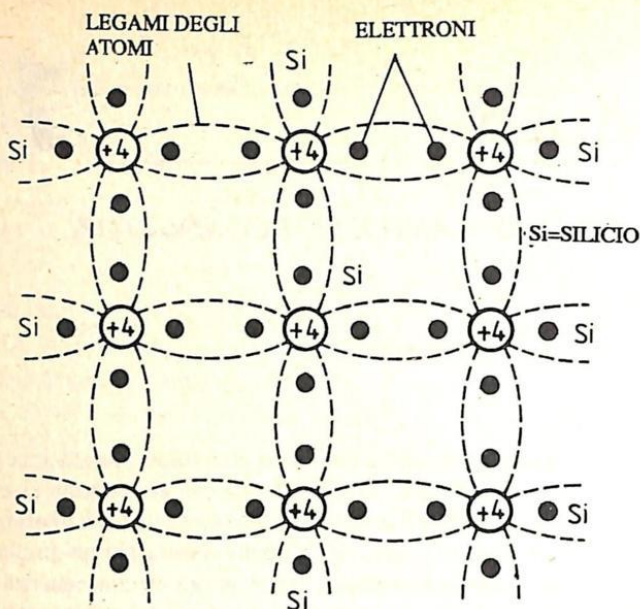


Fig. 1.-Disposizione schematica degli atomi di un semiconduttore di silicio puro. Non esistono lacune nè elettroni liberi.

Un'altra caratteristica che li differenzia si riferisce alla loro resistività, essendo questa intermedia tra quella dei metalli e degli isolanti.

*Il germanio (Ge) e il silicio (Si) costituiscono i due semiconduttori più importanti impiegati nei dispositivi elettronici.* La disposizione schematica degli atomi per un semiconduttore di silicio si può osservare in figura 1. Le zone cerchiata rappresentano la carica positiva netta dei nuclei, e i punti neri sono gli elettroni negativi uniti agli stessi.

La forza che mantiene gli atomi legati tra loro è il risultato del fatto che gli elettroni di conduzione di ciascuno di essi sono condivisi con i quattro atomi vicini.

A basse temperature la struttura normale è quella mostrata in figura 1, in cui non si osserva alcuna lacuna nè elettrone libero e, pertanto, il semiconduttore si comporta come un isolante.

Invece, a temperatura ambiente (20-25°C) qualcuno dei legami forti tra gli atomi si rompe, a causa del riscaldamento del semiconduttore, e, come conseguenza, alcuni elettroni diventano liberi. Nella figura successiva è rappre-



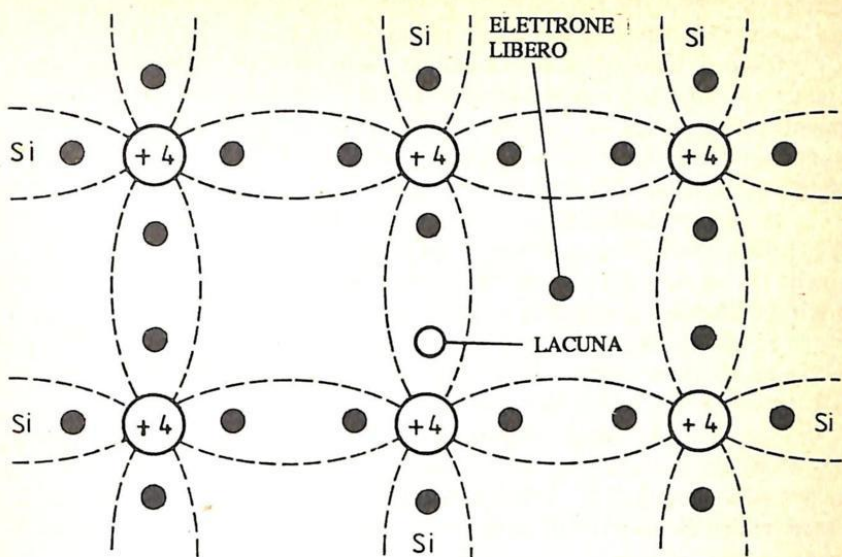


Fig. 2.-L'aumento di temperatura rompe alcuni legami tra atomi, liberando un certo numero di elettroni.

sentata questa situazione. L'assenza dell'elettrone che apparteneva alla giunzione di due atomi di silicio si rappresenta con un cerchio.

Il modo in cui le lacune contribuiscono al flusso della corrente è il seguente: quando un elettrone può vincere la forza che lo mantiene legato al nucleo e abbandona la sua posizione, compare una lacuna; risulta relativamente facile all'elettrone dell'atomo vicino lasciare il suo posto per riempirlo. L'elettrone che lascia la sua sede per riempire una lacuna provoca, a sua volta, un'altra lacuna nella posizione iniziale. In questo modo la vacanza contribuisce alla formazione della corrente come l'elettrone, con una traiettoria opposta a quella di quest'ultimo. Si dice semiconduttore puro quello in cui gli atomi costituenti sono tutti dello stesso tipo (ad esempio di germanio), vale a dire senza alcuna impurezza.

Se a un semiconduttore puro, come il silicio o il germanio, si aggiunge una piccola quantità di atomi diversi (ad esempio arsenico, fosforo, ecc.), si trasformerà in un semiconduttore impuro.

Le impurezze sono classificate in donatrici e accettrici. Se alla struttura del semiconduttore di silicio si aggiunge un'impurezza, come può essere l'arsenico (As) che ha cinque elettroni esterni legati al nucleo con carica positiva

+5, si ottiene la struttura visibile in figura 3.

Quattro dei cinque elettroni dell'atomo di arsenico si uniranno ai corrispondenti elettroni dei quattro atomi di silicio vicini e il quinto rimarrà inizialmente libero, senza un possibile legame, e pertanto si trasformerà in un conduttore di corrente. Queste impurezze che forniscono elettroni portatori (negativi) si dicono donatrici e di tipo  $n$ .

In un semiconduttore con impurezze di tipo  $n$ , non solo aumenta il numero degli elettroni, ma, inoltre, la quantità di lacune diminuisce rispetto a quella del semiconduttore puro. La causa di questa diminuzione è dovuta al fatto che una parte degli elettroni liberi occupa alcune delle lacune esistenti.

Se al semiconduttore puro di silicio si aggiunge qualche impurezza che abbia tre elettroni esterni, questa potrà formare solo tre unioni complete con gli atomi di silicio e l'unione incompleta darà luogo a una lacuna.

Tali tipi di impurezze forniscono quindi portatori positivi, poichè creano lacune che possono accettare elettroni, per cui sono note col nome di accettrici o impurezze di tipo  $p$ . Al contrario di quanto succedeva prima nel tipo  $n$ , in un semiconduttore con impurezze di tipo  $p$  i portatori che diminuiscono, rispetto a quelli del semiconduttore puro, sono gli elettroni.

I semiconduttori che contengono già impurezze donatrici o accettrici, si dicono rispettivamente di tipo  $n$  o  $p$ .

In un semiconduttore di tipo  $n$  gli elettroni sono detti portatori maggioritari e le lacune portatori minoritari. In un materiale di tipo  $p$  gli elettroni sono portatori minoritari e le lacune portatori maggioritari.

## *La giunzione p-n*

Come indica il suo nome è l'unione tra due semiconduttori, uno di tipo  $p$  e l'altro di tipo  $n$ .

Quando in una zona del semiconduttore si introducono donatori e nell'altra accettori, si ottiene una giunzione p-n. L'atomo donatore si rappresenta con un segno +, poichè dopo aver ceduto un elettrone si trasforma in positivo. L'atomo accettore è indicato con un segno - dovuto al fatto che, dopo aver accettato un elettrone, si trasforma in negativo.

In conseguenza di questa giunzione gli elettroni viaggeranno dalla regione di tipo  $n$  alla regione di tipo  $p$ , mentre le lacune viaggeranno in senso opposto. In questo modo gli atomi più vicini alla giunzione rimarranno caricati, quelli della regione  $p$  negativamente e quelli della regione  $n$  positivamente.

A seguito di ciò compare un campo elettrico, diretto dalla zona caricata positivamente a quella caricata negativamente. Questo campo elettrico origina una corrente di elettroni dalla regione di tipo  $p$  alla regione di tipo  $n$  e, per



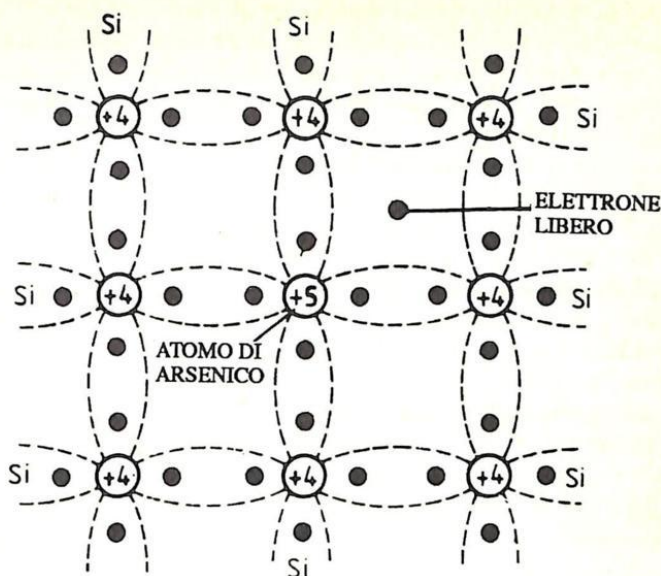


Fig. 3.-Aggiungendo impurezze donatrici, resteranno elettroni liberi; questi tipi di semiconduttori sono detti N.

le lacune, in senso opposto. Alla fine si raggiungerà uno stato di equilibrio in cui la corrente totale attraverso la giunzione p-n diventa uguale a zero.

La conseguenza ultima di questo contatto tra i due semiconduttori, è la comparsa di una differenza di potenziale di *contatto* tra le due regioni.

La caratteristica essenziale della giunzione p-n è quella di costituire un raddrizzatore che permette il passaggio di corrente in un senso, ma si oppone a questa se diretta in senso opposto.

Perchè la giunzione p-n non permetta la circolazione di corrente, deve essere polarizzata in senso inverso, cioè se alla giunzione p-n si collega una batteria, il terminale negativo deve essere collegato al *p* della giunzione, mentre il positivo all'*n*. In questo modo la polarità è tale, che tende ad allontanare le lacune del tipo *p* e gli elettroni del tipo *n* dalla zona di giunzione evitando pertanto la possibile conduzione.

Nel caso in cui la polarizzazione applicata sia diretta, cioè con il terminale negativo della batteria collegata all'*n* della giunzione e il terminale positivo al *p*, le lacune attraverseranno la giunzione dalla regione di tipo *p* fino a quella *n*. In modo simile gli elettroni viaggeranno dalla regione *n* a quella *p*. Pertanto esisterà una corrente reale che attraverserà il semiconduttore comple-



Nella figura 5 è stata usata l'espressione *contatti metallici*.

Come si può osservare, esistono due contatti metallo-semiconduttore, uno per ciascun lato del diodo, e, allo stesso modo in cui accade con la giunzione tra due semiconduttori, può comparire un potenziale di contatto su questi collegamenti addizionali.

Nonostante tutto, si suppone che i contatti metallo-semiconduttore siano stati costruiti in modo tale che non siano raddrizzatori. A un contatto di questo tipo si dà il nome di contatto metallico.

Un'altra delle proprietà più significative dei semiconduttori, è che la loro conducibilità aumenta con la temperatura. Un semiconduttore impiegato in questo modo possiede estese applicazioni in termometria, nella misura di potenza in microonde, come relè termico, e nei dispositivi di controllo il cui funzionamento è basato su di una variazione di temperatura. Qualsiasi semiconduttore che lavori in queste condizioni viene detto termistore.

Le caratteristiche che presenta la giunzione p-n quando è polarizzata inversamente si possono utilizzare anche in pratica.

E' già stato detto che dal punto di vista della circolazione di corrente il loro comportamento è simile a quello di un interruttore aperto, ma, nella pra-

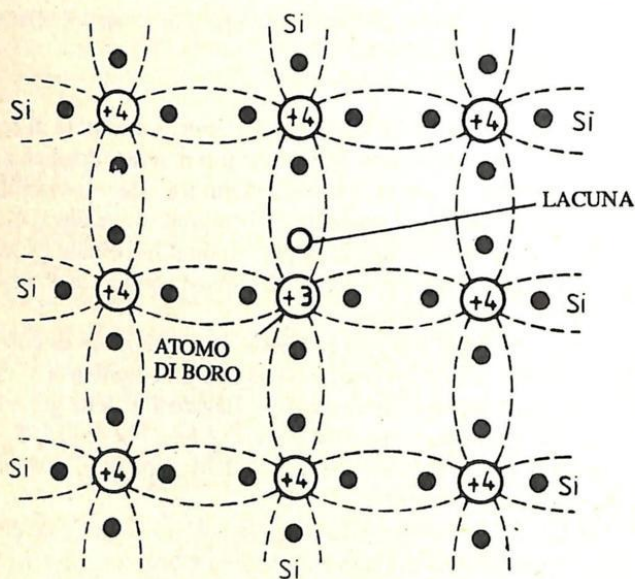


Fig. 4.-Le lacune compaiono introducendo impurezze accettrici nella rete cristallina del silicio, ottenendo un semiconduttore di tipo P.

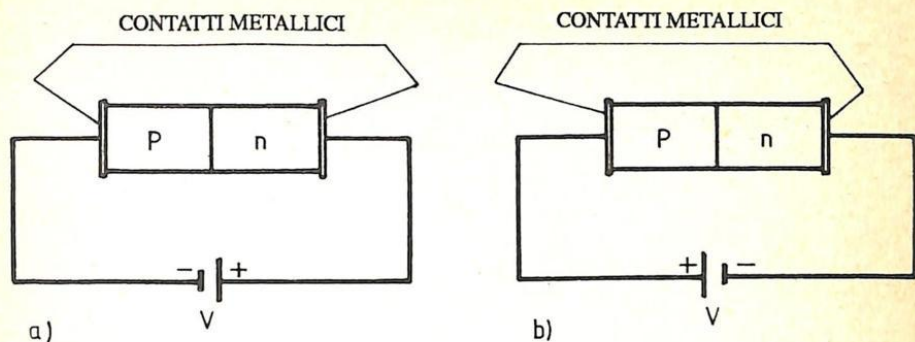


Fig. 5.-a) Giunzione PN polarizzata inversamente. b) Giunzione PN polarizzata direttamente.

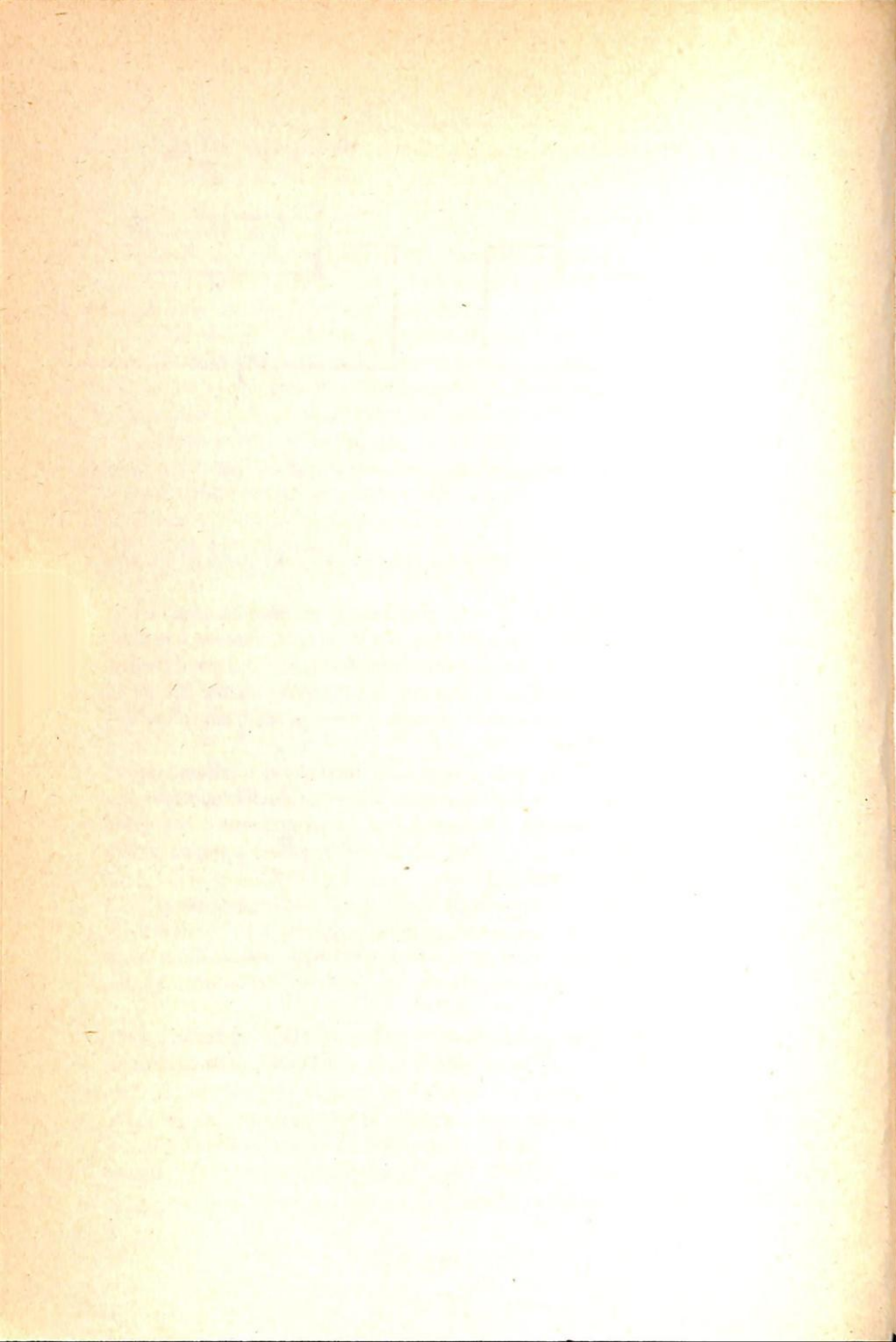
tica, il fenomeno è più simile a quello di una capacità, sottoposta ad una tensione continua.

In effetti, su entrambi i lati della giunzione si produce un accumulo di cariche elettriche, come avviene sulle armature di un condensatore, e la giunzione vera e propria si comporta come un dielettrico che impedisce il passaggio di corrente da un lato all'altro. Tuttavia la capacità risultante non ha un valore costante come nel caso dei condensatori, ma dipenderà dal valore della tensione inversa applicata.

Benchè in generale qualsiasi giunzione semiconduttrice presenti questo tipo di funzionamento, si possono accentuare queste proprietà capacitive impiegando determinate tecniche di fabbricazione. In questo modo si ottengono i diodi *varicap*, molto impiegati nei circuiti ad alta frequenza per applicazioni come la modulazione o la sintonia.

Infine parleremo di un altro degli effetti ottenuti nelle giunzioni p-n che ha un gran numero di applicazioni nell'elettronica moderna. La sua descrizione è semplice, poichè basta immaginare una giunzione polarizzata direttamente con elettroni e lacune che circolano tra ambedue le parti del semiconduttore.

Logicamente quando la traiettoria delle lacune e degli elettroni coincide, si produce quella che si dice *ricombinazione*, con la scomparsa di entrambi e la liberazione di una certa quantità di energia sotto forma di onda elettromagnetica. Impiegando certi materiali, come impurezze nel semiconduttore base, si può ottenere che detta radiazione sia di tipo luminoso, ottenendo un diodo luminescente o LED. Uno dei materiali più impiegati a questo scopo è l'arseniuro di gallio (GaAs).





## IL DIODO SEMICONDUTTORE

**I**

Il diodo semiconduttore è costituito fondamentalmente da una giunzione P-N con un terminale di connessione su ciascuno dei due contatti metallici posti alle sue estremità, e da un contenitore che contiene tutto l'insieme; i terminali che fuoriescono, corrispondono all'anodo (zona P) e al catodo (zona N).

Il diodo si lascia attraversare dalla corrente quando si connette il polo positivo della batteria all'anodo, e il negativo al catodo, mentre si oppone al passaggio della stessa se si effettua il collegamento opposto.

Questa interessante proprietà può essere utilizzata per realizzare la conversione della corrente alternata in continua; tale procedimento è detto *rad-drizzamento*.

In effetti, se si applica a un diodo una tensione alternata, ci sarà circolazione di corrente solo quando l'anodo è più positivo del catodo, cioè nei semicicli positivi, e rimarrà bloccata durante quelli negativi, in cui il passaggio della corrente è impedito dal fatto che in queste circostanze l'anodo è più negativo del catodo.

La corrente risultante sarà *pulsante*, poichè circolerà solo in determinati istanti, ma, mediante dispositivi e circuiti adeguati inseriti di seguito, potrà essere convertita in una corrente continua costante.

Il diodo semiconduttore è attualmente impiegato quasi in esclusiva, e presenta rispetto a quello a vuoto alcuni vantaggi fondamentali:

- E' di dimensioni molto più ridotte, il che contribuisce alla miniaturizzazione dei circuiti.
- Possiede solo due terminali, il che facilita molto il suo montaggio, soprattutto nei circuiti stampati.
- La quantità di calore generata durante il funzionamento è minore,

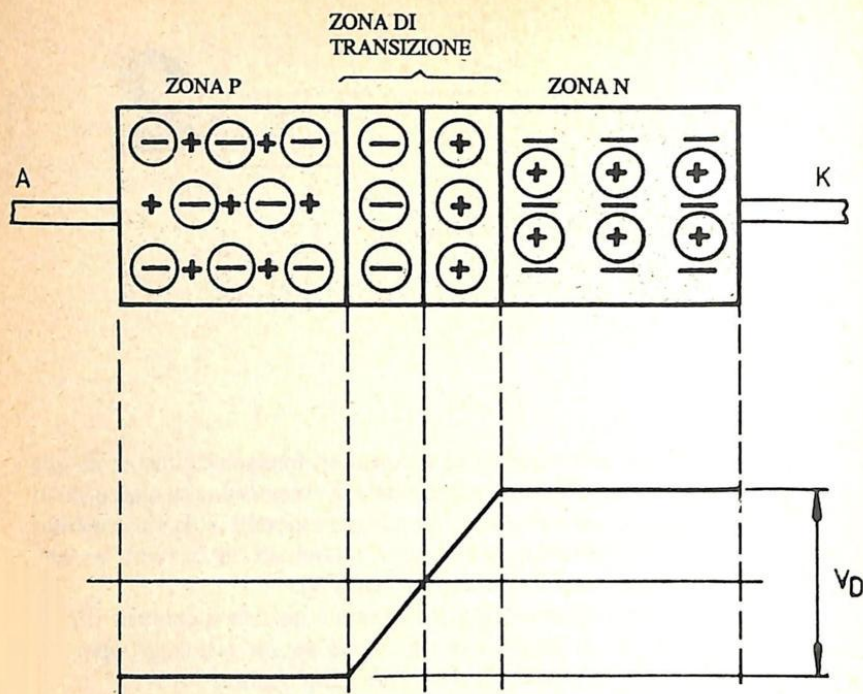


Fig. 1.-Diodo semiconduttore. Curva della differenza di potenziale che si genera ai lati della giunzione.

poichè non necessita di riscaldamento del filamento.

- Funziona con tensioni molto più basse, il che rende possibile il suo impiego in circuiti alimentati da pile o batterie.
- Può essere utilizzato in apparecchi che usano correnti elevate, applicazione che con i diodi a vuoto risultava proibitiva in certi casi per le grandi dimensioni di questi.

Esistono diodi semiconduttori di dimensioni molto piccole per applicazioni che non richiedono correnti elevate, come la demodulazione nei ricevitori radio.

Questi sono di solito incapsulati in un contenitore cilindrico di vetro con i terminali alle estremità, benchè per questo scopo si utilizzino anche quelli incapsulati nella plastica.



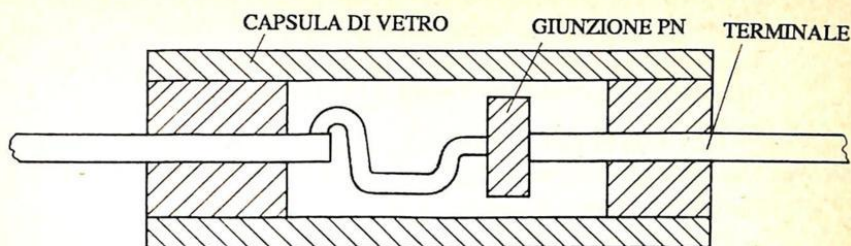


Fig. 2.-Diodo a punta di contatto.

### Classificazione

Nell'ampio insieme di modelli e tipi diversi di diodi semiconduttori che esistono attualmente sul mercato, si può effettuare una classificazione, in modo da raggrupparli in varie famiglie, tenendo conto delle caratteristiche più

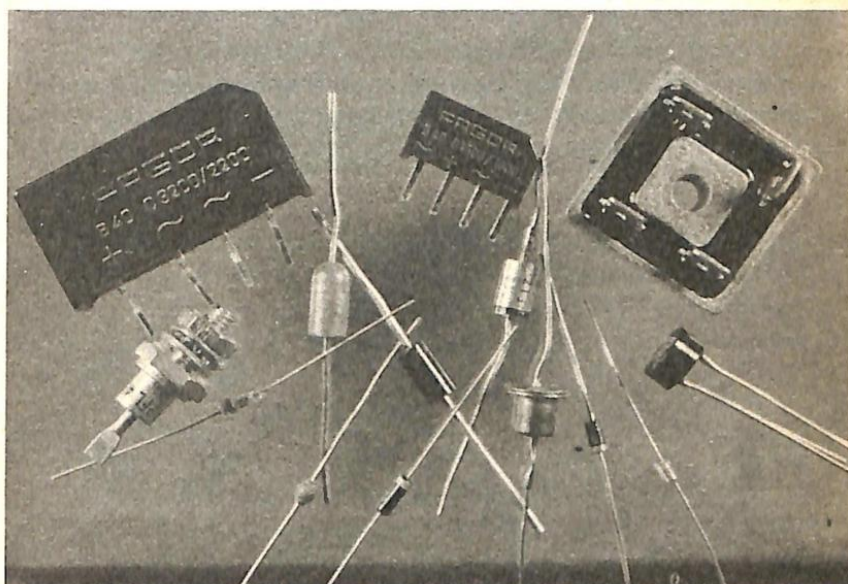


Fig. 3.-Esiste una gran varietà di diodi per le diverse applicazioni.



specifiche e che, di fatto, sono quelle che determinano le loro applicazioni.

In questo modo si possono suddividere in:

- Diodi raddrizzatori per tutta la gamma di potenze, con incapsulamento singolo o a ponte.
- Diodi di segnale per uso generale.
- Diodi di commutazione.
- Diodi per alta frequenza.
- Diodi stabilizzatori di tensione.
- Diodi speciali.

### *Diodi raddrizzatori*

La famiglia dei diodi rettificatori è concepita soprattutto per questa applicazione, benchè i tipi in bassa potenza possano anche essere utilizzati come diodi di segnale o di commutazione in circuiti a corrente continua o a bassa frequenza, e in quelli di tipo digitale che non richiedano velocità molto elevate.

Il tipo di contenitore di questi diodi dipende dalla potenza che devono dissipare.

Per quelli di bassa e media potenza, fino ad un limite di circa 1 W, si utilizza il tipo plastico. Per valori superiori, si rende necessario un contenitore metallico che, per potenze molto alte, dovrà essere predisposto per poter essere installato su di un dissipatore di calore, mediante un sistema di fissaggio a vite.

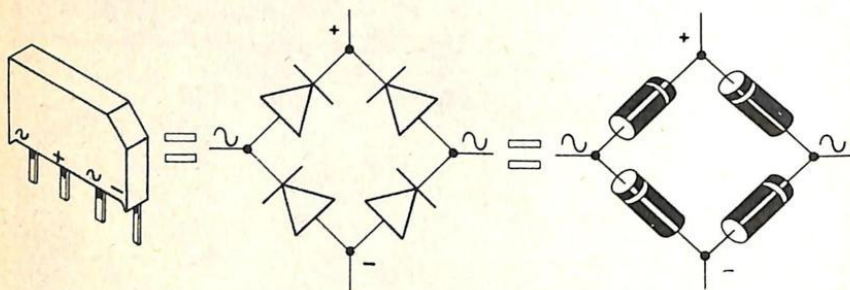


*Fig. 4.-Ponte raddrizzatore a onda completa che incorpora quattro diodi uguali.*

Qualunque dispositivo raddrizzatore di corrente, sia monofasica che trifasica o polifasica, si realizza utilizzando quattro diodi collegati in una configurazione detta a *ponte*.

In alternativa al *ponte* si può anche utilizzare un altro sistema a due diodi, in alcuni circuiti monofasici.

Dato il grande consumo di diodi a livello mondiale, che in gran parte sono utilizzati in configurazione a *ponte*, i costruttori hanno deciso di realizzare essi stessi questa disposizione, collegando direttamente in fase di fabbricazione i quattro diodi, e inserendoli in un contenitore unico.

Questo ha causato la comparsa di vari modelli di ponti a diodi, con diverse intensità massime di corrente e, pertanto, con dissipazioni di potenza più o meno elevate, allo stesso modo dei semplici diodi.

Nei tipi a dissipazione più elevata, il contenitore del ponte è metallico ed è predisposto per essere montato su radiatore.

## Caratteristiche

Qualunque diodo raddrizzatore è caratterizzato dai seguenti parametri:

- Corrente diretta massima ( $I_f$ ).
- Tensione diretta ( $V_d$ ), per una determinata corrente  $I_f$ .
- Tensione inversa di lavoro massima di picco (VRWM).
- Tensione inversa massima di picco ripetitiva (VRRM).
- Corrente massima di picco ( $I_{fsm}$ ).
- Corrente inversa massima di picco (IRM), misurata a VRRM.
- Potenza totale ( $P_{tot}$ ).

Nel momento della scelta del modello più adeguato per una determinata applicazione, occorrerà tener conto di queste caratteristiche, facendo attenzione di non avvicinarsi ai valori limite, perchè si diminuirebbe eccessivamente la durata del componente.

## Diodi di segnale

I diodi di segnale per uso generale si impiegano per il trattamento del segnale, all'interno di un circuito, o anche per realizzare operazioni di tipo digitale per ottenere parti di *porte* logiche e circuiti equivalenti. Sono di bassa potenza.

Le caratteristiche di questi diodi sono:



- Tensione inversa ( $V_r$ ) fino a 75 V massimi.
- Corrente diretta ( $I_f$ ) 100 mA.
- Potenza massima ( $P_{tot}$ ) 200 mW.

Il contenitore, con dimensioni talmente piccole da essere detto *in miniatura*, è di forma cilindrica, in plastica o vetro, con i terminali di connessione situati alle estremità.

Sul corpo viene indicato il terminale di collegamento che corrisponde al catodo, mediante un anello colorato situato in prossimità di questo.

### *Diodi di commutazione*

I diodi di commutazione o rapidi, si caratterizzano per essere in grado di lavorare con segnali di tipo digitale o *logici* che presentino un tempo di salita e discesa dei fronti molto breve. Il fattore o parametro che caratterizza questi diodi è il tempo di recupero inverso (TRR), che esprime il tempo di ritardo impiegato dalla giunzione P-N nello sgombrare la carica elettrica che accumula quando è polarizzata inversamente (effetto simile all'accumulazione di carica di un condensatore), e riceve improvvisamente una variazione di tensione che la polarizza in senso diretto.

Possono essere considerati rapidi, nei modelli di media potenza, quei diodi con un TRR inferiore a 400 nanosecondi; per quelli di bassa potenza questo tempo è dell'ordine dei 5 nanosecondi.

### *Diodi per alta frequenza*

I diodi per alta frequenza si usano in quelle parti di circuito che devono funzionare con frequenze superiori a 1 MHz (un milione di cicli per secondo). Sono caratterizzati per avere una bassa capacità di diffusione ( $C_d$ ) tra le due zone semiconduttrici che formano la giunzione P-N, quando sono polarizzati in senso diretto.

### *Diodi zener*

I diodi stabilizzatori di tensione si usano, come dice il loro nome, per produrre, ai loro capi, una tensione costante e relativamente indipendente dalla corrente che li attraversa.

Sfruttano, per il loro funzionamento, una proprietà molto interessante



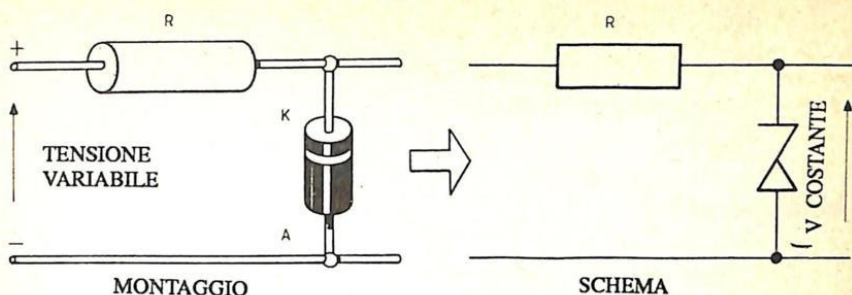


Fig. 5.-Diodo zener utilizzato in un circuito stabilizzatore di tensione.

che presenta la giunzione semiconduttrice quando è polarizzata inversamente, oltre un determinato livello.

Normalmente un diodo che riceve una polarizzazione inversa non permette il passaggio della corrente, se non un piccolissimo flusso detto corrente di fuga. Tuttavia, raggiunta una determinata tensione, detta *tensione di zener*, si ha un aumento della quantità di corrente che può fluire attraverso la giunzione, pur avendo una differenza di potenziale alle estremità praticamente costante, anche se si cerca di aumentarla o diminuirla variando l'intensità che la attraversa.

Esiste un'ampia gamma di tipi, classificati in base ad una serie di tensioni di zener unificate e alla potenza che sono in grado di dissipare, dai 250 mW fino a decine di watt, in contenitori plastici o metallici.

I parametri che caratterizzano un diodo zener sono:

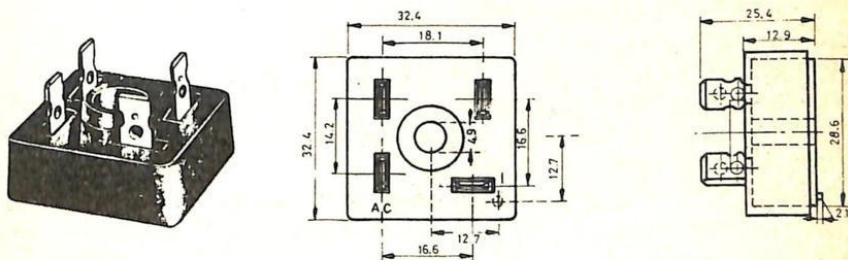


Fig. 6.-Ponte raddrizzatore di potenza, con foro di fissaggio per dissipatore.

- Tensione zener ( $V_z$ ).
- Corrente minima per raggiungere la  $V_z$  ( $I_z$ ).
- Potenza massima ( $P_{tot}$ ).

### *Diodi speciali*

Nel gruppo dei diodi speciali sono compresi i diodi *varicap*, i diodi *tunnel* e i diodi *LED*. I primi si costruiscono cercando di accentuare al massimo la proprietà che presenta la giunzione P-N di comportarsi in modo analogo a un condensatore, quando è polarizzata inversamente.

La capacità risultante è, inoltre, variabile con la tensione applicata, il che permette di disporre di una forma più semplice di condensatore variabile, controllato da una differenza di potenziale. Il suo impiego è molto generalizzato negli stadi di sintonia dei ricevitori radio e TV.

## TRANSISTORI BIPOLARI

**I**

l transistor è, attualmente, il componente fondamentale e imprescindibile in qualsiasi circuito elettronico che esegua operazioni di amplificazione, controllo, elaborazione dati, calcolo numerico, radio e TV, stabilizzazione di tensione o corrente, ecc.

Esistono due tipi fondamentali di applicazione: come elemento utilizzabile in modo individuale o discreto, oppure incorporato in un *circuito integrato* di cui costituisce sempre l'elemento base di funzionamento.

In questo momento ci occuperemo del primo tipo.

*Principio di funzionamento*

Il transistor è un elemento semiconduttore che ha la proprietà di poter regolare a volontà l'intensità di corrente che circola attraverso due dei suoi tre terminali, tramite l'azione di una piccola corrente, molto più bassa della precedente, applicata al terzo terminale.

I due primi terminali si chiamano *emettitore* e *collettore*, mentre il terzo prende il nome di *base*.

Il fenomeno descritto è, in definitiva, un'amplificazione di corrente poiché, grazie all'azione di una debole intensità che può essere soggetta a qualsiasi forma di variazione nel tempo, come segnali audio, radio, TV, ecc., si ottiene la stessa forma di variazione su una corrente maggiore, fornita da un circuito di alimentazione, il che permette di poter realizzare, negli stadi successivi, la trasformazione di un segnale debolissimo in un altro sufficientemente forte da essere in grado di produrre suoni in un altoparlante, immagini in un televisore, ecc.



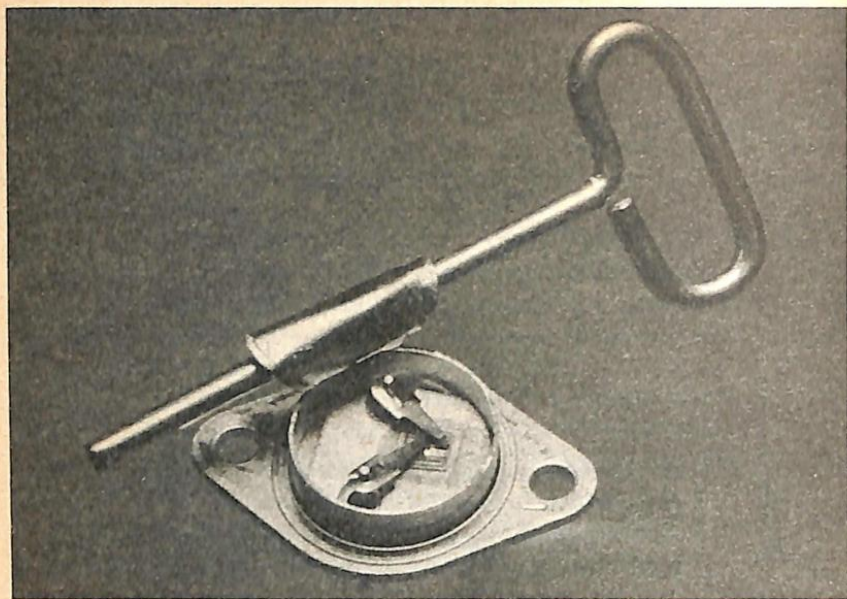


*Fig. 1.-Vista interna di un transistor di potenza. Si notano le connessioni di base e emettitore. Il collettore è elettricamente collegato al contenitore metallico.*

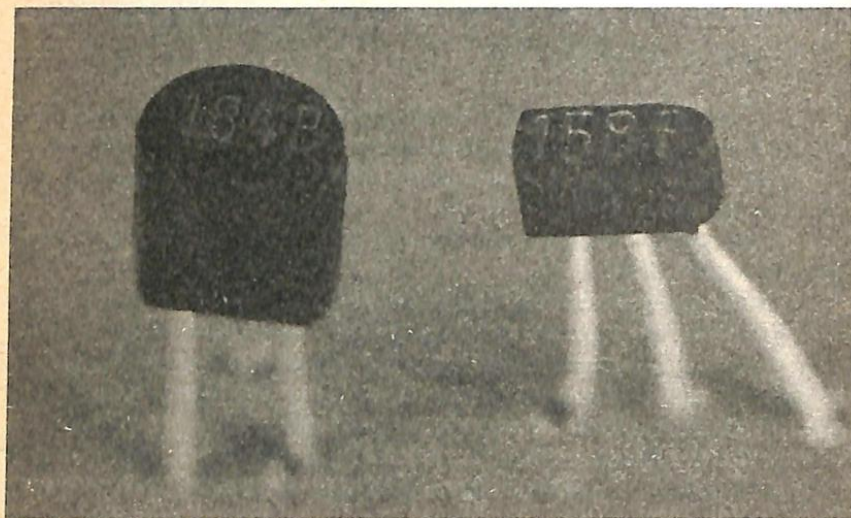


*Fig. 2.-Transistore di bassa potenza in contenitore plastico.*

## Origini del transistor

La parola transistor si ottenne dalla composizione di altre due (TRANSFERISTOR) che descrivono la sua applicazione più immediata o di trasferimento di resistenza. Fu scoperto nel 1948 da Shockley come risultato dei lavori effettuati, precedentemente, da Bardeen e Brattain sui fenomeni elettrici sulla superficie dei semiconduttori.

I tre scienziati ricevettero il premio Nobel per la fisica nel 1956.

## Funzionamento del transistor bipolare

Il funzionamento interno del transistor può essere descritto partendo dai concetti sviluppati nel capitolo dedicato al diodo semiconduttore. A differenza di questo, il transistor dispone di due *giunzioni semiconduttrici*, separate da un sottilissimo strato di materiale.

Supponiamo di disporre di una struttura formata da due zone di materiale semiconduttore di tipo N (costituito da germanio o silicio in cui è stato diffuso una seconda sostanza che ha un eccesso di elettroni, come il fosforo o l'arsenico), e che tra loro esista uno strato molto sottile di un altro materiale di tipo P (ottenuto a partire dallo stesso materiale base, con l'aggiunta di una impurezza che produca una carenza di elettroni, come l'indio o il boro).

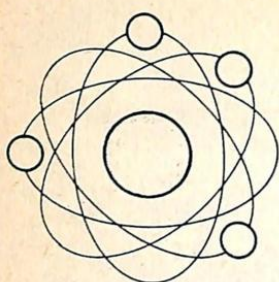
L'insieme forma due giunzioni: una N-P e l'altra P-N per cui, tra queste tre zone, si produce un movimento di elettroni, simile a quello che si ha in un diodo, che provoca la comparsa di due *regioni di transizione* nelle quali si generano delle piccole differenze di potenziale, di modo che le due zone N si troveranno ad una tensione leggermente più positiva della zona P intermedia.

## Polarizzazione

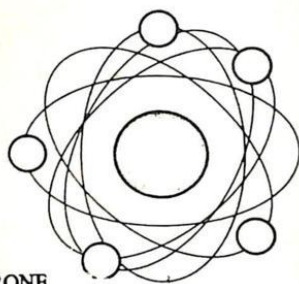
Se ora si applica una tensione esterna, proveniente da una batteria o da qualche circuito di alimentazione, in modo *diretto* alla prima giunzione N-P, le cui due zone si chiamano *emettitore* e *base*, rispettivamente, con il negativo collegato all'*emettitore* e il positivo alla *base*, si otterrà una circolazione di corrente tra le due regioni.

Applicando una seconda tensione esterna alla giunzione P-N rimanente, costituita dalla *base* e da una terza zona detta *collettore*, in senso *inverso* (negativo alla *base* e positivo al *collettore*) si avrà che la corrente di elettroni, generatasi con la prima tensione applicata, sarà attratta dalla differenza di potenziale positiva applicata al *collettore*, nonostante la forte opposizione che

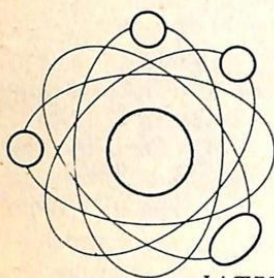




ATOMO  
ALLO STATO NATURALE



ELETTRONE  
IN ECCESSO



LACUNA

ATOMO DI  
SEMICONDUTTORE  
TIPO P

ATOMO DI  
SEMICONDUTTORE  
TIPO N

Fig. 3.-Atomi di materiali semiconduttori. Esistono tre possibilità: stato neutro, mancanza di un elettrone (P), e eccesso di un elettrone (N).

genera la giunzione *base-collettore* polarizzata in senso inverso, per cui la corrente partita dall'emettitore raggiungerà praticamente nella sua totalità il collettore, salvo una piccolissima frazione che passa per la connessione di base.

Ebbene questa frazione di corrente è quella che è capace di comandare o *modulare* la principale, con gli effetti già descritti, poichè questa sarà sempre un multiplo di quella di *base*.

Se supponiamo, ad esempio, che la corrente principale  $I$  sia 100 volte la corrente di *base*  $I_b$ , e questa sia di 5 mA,  $I$  sarà di 500 mA; se  $I_b$  diminuisce a 2 mA,  $I$  diventerà di 200 mA.

Si può quindi osservare facilmente, che una piccola variazione (di 3 mA) nella corrente di *base* provoca una grande variazione (di 300 mA) nella corrente principale tra *emettitore* e *collettore*.

Il fattore di amplificazione di corrente (100 nell'esempio precedente), viene generalmente definito con  $\beta$  (Beta).



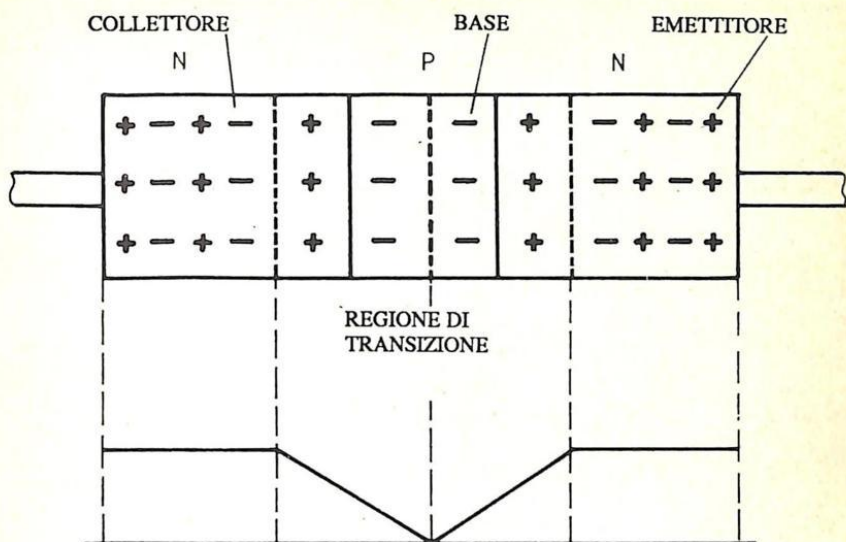


Fig. 4.-Giunzioni formate all'interno di un transistor. Le due regioni di transizione si sovrappongono alla base.

### Criteri relativi al senso della corrente

Finora, ed in tutta l'esposizione precedente, è stato utilizzato come senso di circolazione della corrente quello seguito in realtà dagli elettroni. Tuttavia, la forma convenzionale di circolazione stabilita universalmente considera sempre la corrente, per un transistor NPN, come entrante dal *collettore* e dalla *base*, e uscente dall'*emettitore*.

Un'altra forma costruttiva dei transistori, con gli stessi principi di funzionamento, è quella che sfrutta materiale di tipo P per il *collettore* e l'*emettitore*, e di tipo N per la *base*. L'elemento così ottenuto si chiama transistor PNP. Le sue uniche differenze con il modello NPN stanno nel fatto che le correnti che lo attraversano sono esattamente di senso opposto, essendo necessario utilizzare tensioni esterne di polarizzazione di segno opposto.

### Lacune

Per completare tutto quanto è in relazione con la struttura interna del tran-

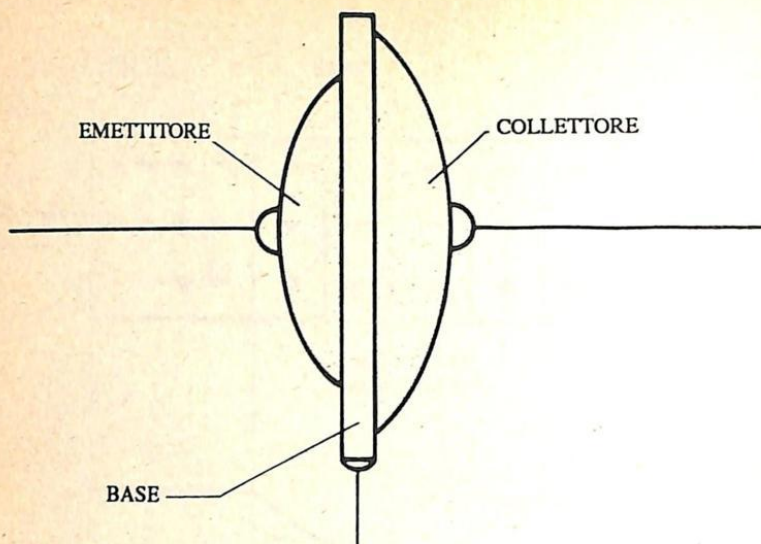


*Fig. 5.-Disegno schematico di un transistor. Il collettore deve avere una superficie di contatto maggiore per facilitare la raccolta della corrente.*



*Fig. 6.-Transistori di bassa e media potenza con contenitore metallico.*



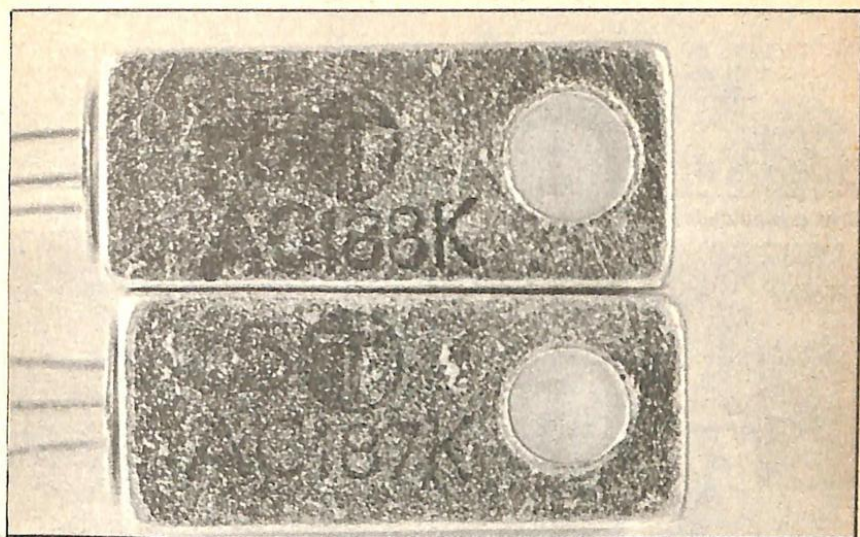


Fig. 7.-Due transistori simili nell'aspetto, ma con caratteristiche opposte benchè molto somiglianti, essendo uno NPN e l'altro PNP. Si dicono complementari.

sistore, è importante conoscere un termine che si usa con molta frequenza in tutti i testi esistenti sull'argomento. Questa parola o termine è lacuna: il suo concetto è abbastanza semplice, poichè con esso si definisce l'assenza o mancanza di un elettrone in un determinato materiale, che presuppone la capacità di poter essere *riempita*, passando da uno stato neutro ad uno con carica negativa.

Utilizzando questo concetto, un materiale semiconduttore di tipo P sarà quello che dispone di un certo eccesso di *lacune*, e il fenomeno dell'unione di una *lacuna* con un elettrone si definisce ricombinazione.

### *Corrente costante*

Una proprietà molto interessante del transistor, è la sua capacità di fornire un'intensità di corrente fissa e costante a una resistenza, in modo indipendente dal suo valore ohmico.

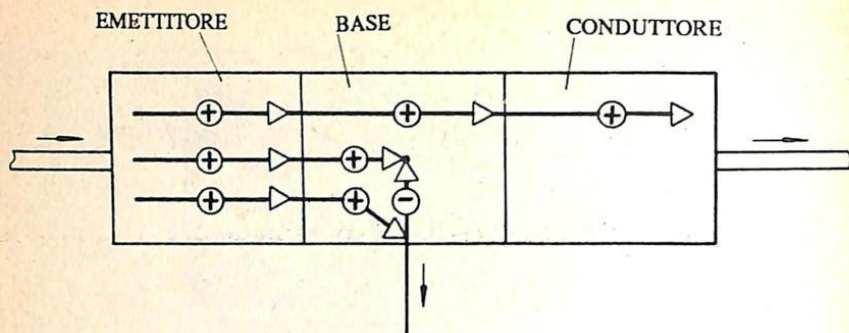


Fig. 8.-Effetto di ricombinazione. La lacuna e l'elettrone scompaiono.

Pertanto, le variazioni di corrente dovute all'azione della base, produrranno ai capi della resistenza delle variazioni di tensione, che potranno essere calcolate mediante la legge di Ohm ( $V=RxI$ ), e dipenderanno quindi dalla corrente di base e dal valore della resistenza  $R$  che si collega al collettore, che assumeranno valori maggiori quanto più alta è  $R$ , rimanendo il limite massimo fissato, ovviamente, dalla tensione esterna di alimentazione.

Il risultato di tutto questo sarà una *amplificazione di tensione*, calcolata come rapporto tra la tensione, ottenuta sulla resistenza, detta di carico, e quella applicata alla giunzione base-emettitore per generare la corrente che è definita di base.

## Classificazione

Con la definizione di transistori, vengono indicati quattro tipi di elementi costruiti con diverse tecnologie, e con caratteristiche e proprietà differenziate, che sono i seguenti:

- Transistori BIPOLARI.
- Transistori FET.
- Transistori MOSFET.
- Transistori UNIGIUNZIONE.

I primi sono quelli già menzionati precedentemente, e di cui si conosce la struttura interna, formata da tre parti dette emettitore, base e collettore, che possono essere di tipo NPN o PNP.



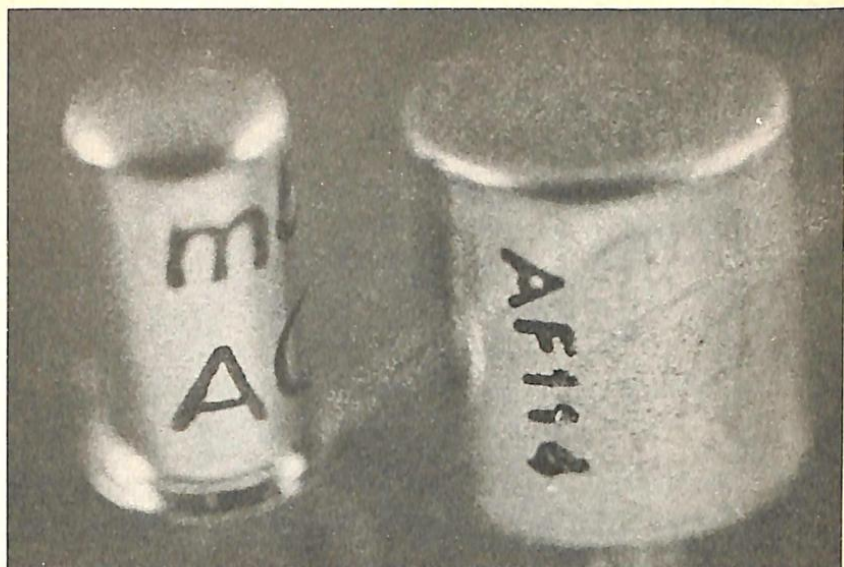


Fig. 9.-Due transistori bipolari al germanio con contenitore metallico.

### *Curve caratteristiche*

Questi transistori si studiano e si analizzano utilizzando delle curve, tracciate in coordinate cartesiane, che vengono dette *curve caratteristiche di un transistor*.

Con esse si può conoscere completamente il comportamento o funzionamento elettronico dell'elemento, poichè esprimono graficamente le relazioni tra le correnti  $I_b$ ,  $I_c$ , e  $I_e$ , in funzione delle tensioni esterne applicate, per qualsiasi configurazione in cui il transistor viene impiegato: emettitore comune, base comune, e collettore comune.

Le curve non sono universali, pertanto ciascun tipo reale di transistor possiede le proprie, normalmente diverse da quelle degli altri, benchè di forma simile.

D'altra parte queste curve non corrispondono esattamente a ciascun transistor, bensì rappresentano le caratteristiche medie di una serie fabbricata in un elevato numero di unità.

E' necessario conoscere, inoltre, i valori massimi, minimi e tipici delle caratteristiche più importanti, per poter impiegare quello che risulta più adatto, allo scopo di garantire il funzionamento in qualsiasi condizione.



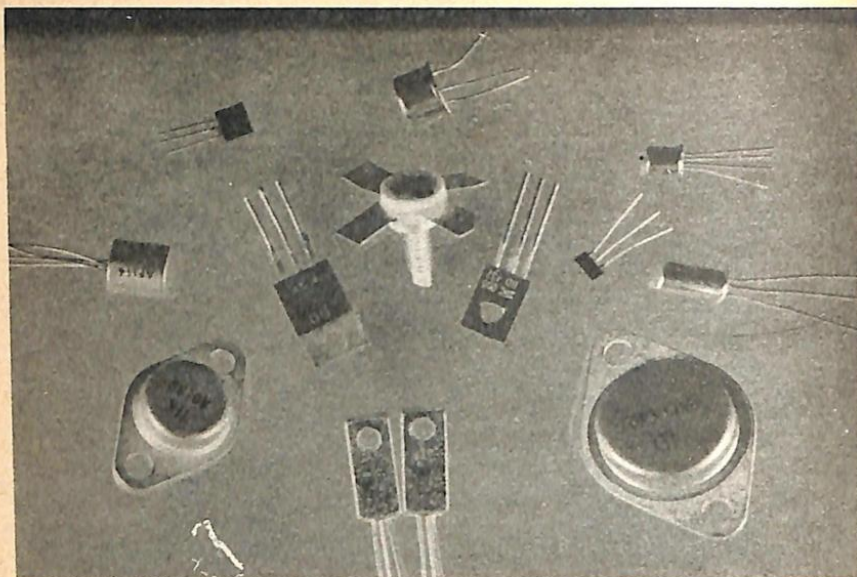


Fig. 10.-Famiglia di transistori bipolari. Se ne possono osservare molti dei tipi esistenti sul mercato.

Poichè le caratteristiche fornite dai costruttori sono di solito sempre riferite ad un montaggio ad emettitore comune, saranno quelle che si prenderanno come riferimento.

### *Famiglie di curve*

Esistono due famiglie di curve di speciale importanza, le caratteristiche di ingresso e quelle di uscita. Le curve di ingresso esprimono graficamente la relazione tra la corrente di base ( $I_b$ ) e la tensione base-emettitore ( $V_{be}$ ) per una tensione collettore-emettitore costante. Con esse si può calcolare la corrente che circola nella base quando si applica una tensione esterna tra questa e l'emettitore.

Corrispondono alle curve di un diodo con polarizzazione diretta. Esiste una determinata tensione di soglia, al di sotto della quale la corrente è praticamente nulla. Questo valore di tensione è di 0,3 V per i transistori al germanio e di 0,6 V per quelli costruiti con silicio.

Da questa si può anche dedurre la *resistenza di ingresso* del transistoro,

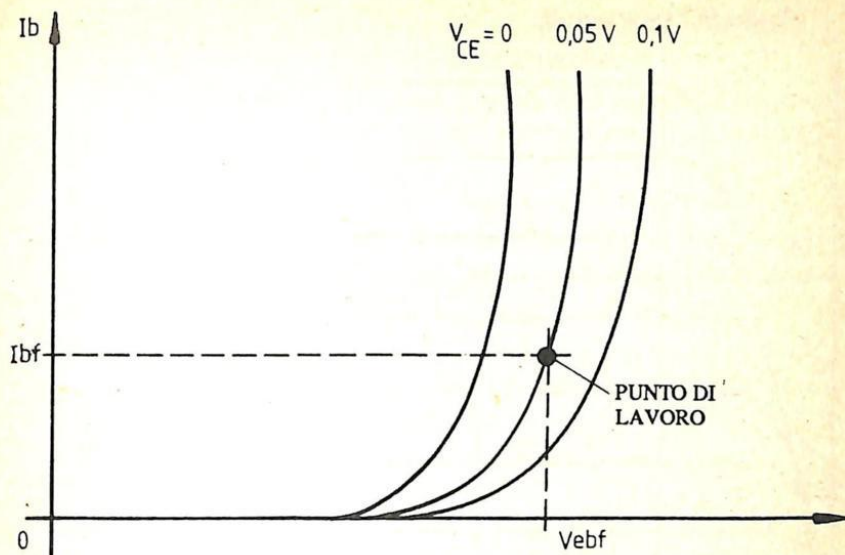


Fig. 11.-Curve caratteristiche di entrata per un transistor configurato ad emettitore comune. Su di esse è stato tracciato il punto di lavoro per una tensione base-emettitore  $V_{bef}$ .

osservando l'aumento che avviene nella corrente di base aumentando la tensione base-emettitore di una certa quantità nota, e dividendo questo secondo incremento per il primo:

$$\text{Resistenza} = \frac{\text{Aumento di } V_{be}}{\text{Aumento di } I_b}.$$

Le curve di uscita esprimono la corrente di collettore ( $I_c$ ) che si ottiene quando si applica una tensione collettore-emettitore ( $V_{ce}$ ) determinata, e si mantiene costante la corrente di base  $I_b$ .

Normalmente si disegna una famiglia completa di curve, per intensità di base diverse, scrivendo su ciascuna curva il valore della corrente di base con cui è stata ottenuta.

Si può osservare nelle figure, che al di sopra di un certo valore di tensione collettore-emettitore  $V_{cef}$ , la corrente si mantiene praticamente indipendente dalla tensione. Al di sotto di questo valore succede giustamente il contrario, per cui la corrente  $I_c$  aumenta rapidamente per piccoli aumenti della tensione.



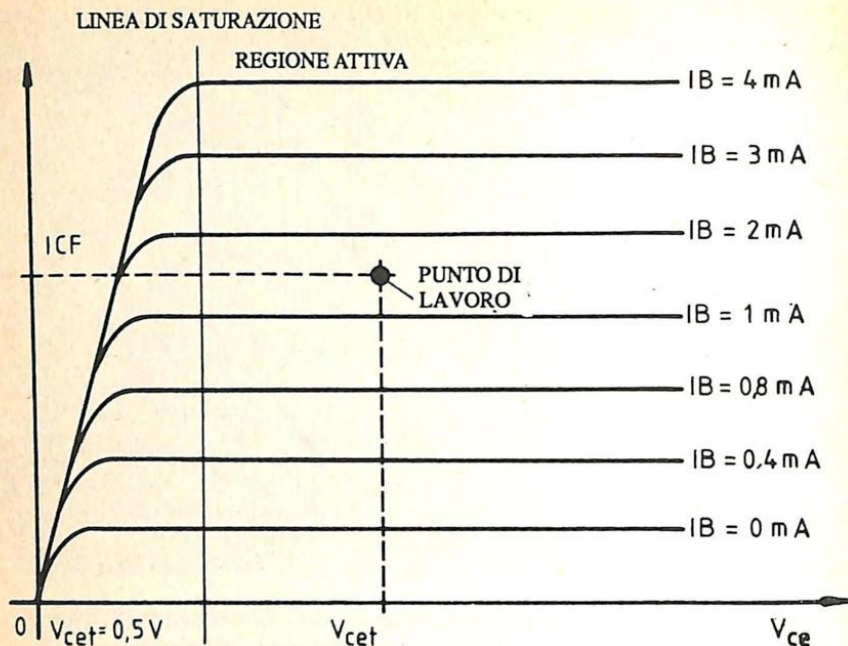


Fig. 12.-Curve caratteristiche di uscita per configurazione ad emettitore comune. Si osserva il punto di lavoro ottenuto con la corrente  $I_{cf}$  e la tensione  $V_{cef}$ .

La tensione  $V_{cef}$  è dell'ordine di 0,5 V. La zona di corrente quasi costante è detta *regione attiva*, sfruttata negli amplificatori; in essa la corrente  $I_c$  non dipende che da  $I_b$ .

Da queste curve si può calcolare il guadagno di corrente del transistor ( $\beta$ ), così come la resistenza di uscita, osservando l'aumento di  $I_c$  per un aumento di  $V_{ce}$  e dividendo, come nel caso precedente, l'ultimo per il primo:

$$\text{Resistenza} = \text{Aumento di } V_{ce} / \text{Aumento di } I_c.$$

Essendo la curva quasi orizzontale, questa resistenza sarà molto alta, risultato che già si prevedeva esistendo una giunzione P-N polarizzata inversamente (base-collettore). Combinando la curva di ingresso con quella di uscita, si può calcolare la risposta del transistor in seguito ad un ingresso di segnale attraverso la base.

## Valori massimi

Si definisce, per ciascun tipo di transistor, un insieme di valori massimi delle sue caratteristiche, che non dovranno mai essere superati durante il funzionamento. Sono i seguenti:

- Tensione massima collettore-emettitore per  $I_b=0$ ,  $V_{ceo}$ .
- Tensione massima base-emettitore  $V_{be}$ .
- Corrente massima di collettore  $I_c$ .
- Potenza massima dissipata  $P_d$  o  $P_{tot}$ .

L'ultima caratteristica si ottiene moltiplicando la corrente di collettore ( $I_c$ ) per la tensione collettore-emettitore. Si può disegnare una curva di massi-

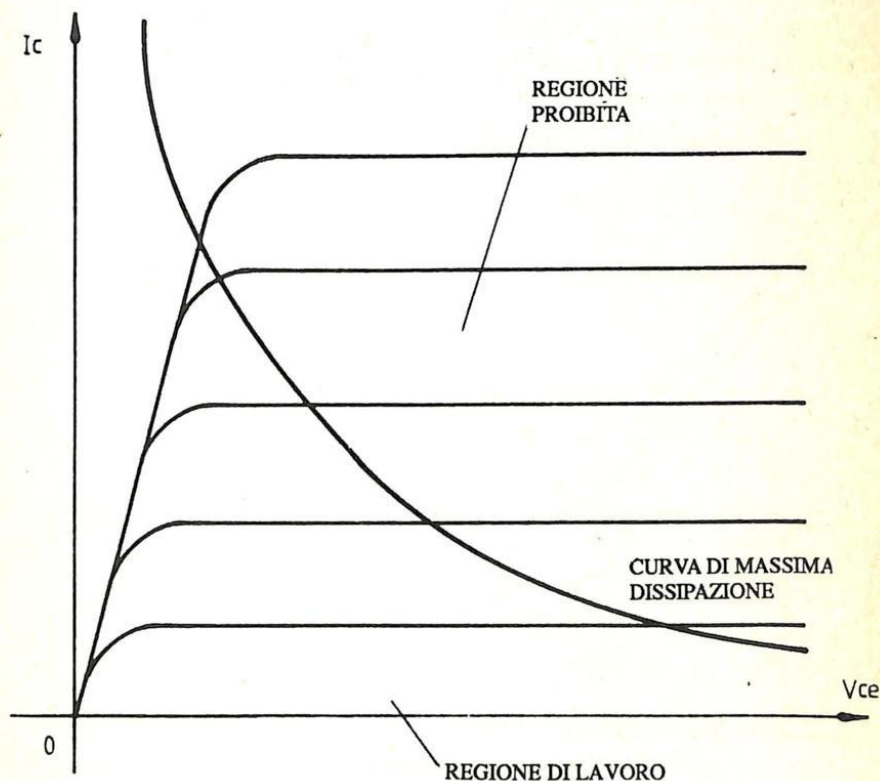


Fig. 13.-Curva di massima dissipazione di potenza. Il transistor dovrà lavorare fuori dalla zona superiore delimitata dalla curva.



ma dissipazione di potenza sulle curve caratteristiche di uscita, separando così la zona a partire dalla quale non si può far lavorare il transistor senza il rischio di danneggiarlo.

### Costruzione

Esistono varie tecnologie per la costruzione dei transistori. La prima di esse fu quella utilizzata per la costruzione del primo transistor della storia, che diede origine all'invenzione di questo componente.

Si dice a *punta di contatto* e consiste in due punte di tungsteno, inserite a pressione su una base di germanio o silicio, che, sottoposte a un trattamento adeguato, formano una regione simile alla P e alla N. Per questo le punte devono essere poste a distanza ravvicinata tra loro, normalmente inferiore a 25 micron (1 micron=0,001 millimetri).

Questo procedimento di fabbricazione è oggi in disuso.

Attualmente si impiegano le seguenti tecnologie di fabbricazione:

- Tecnica per lega.
- Tecnica per diffusione.

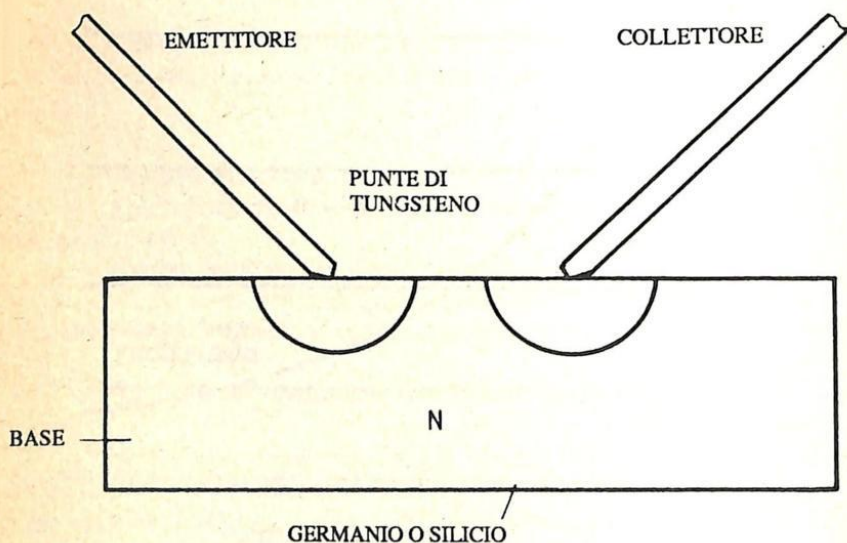


Fig. 14.-Schema della struttura di transistor ottenuto con la tecnologia a punta di contatto.

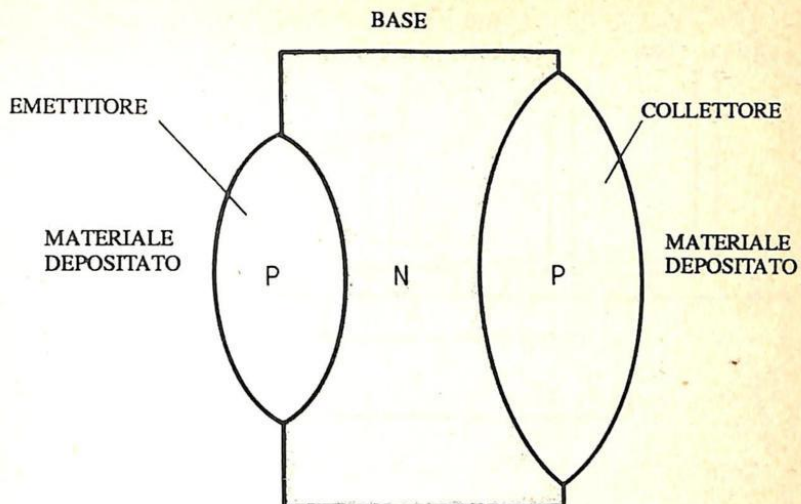


Fig. 15.-Sezione schematica di un transistor costruito con la tecnologia a lega.

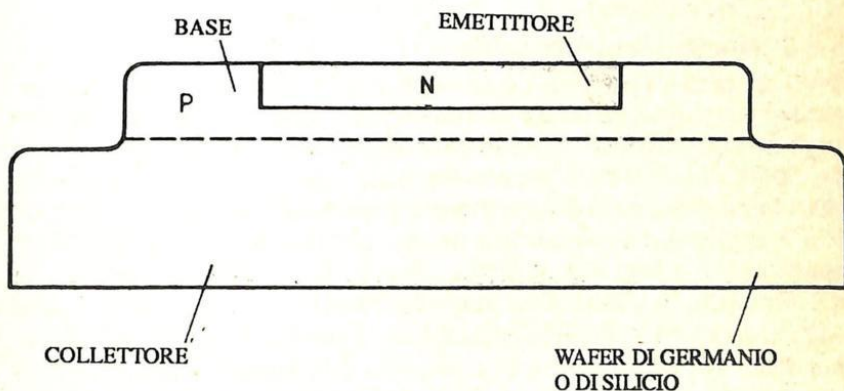


Fig. 16.-Transistore ottenuto per diffusione. E' rappresentata un sezione dello stesso.



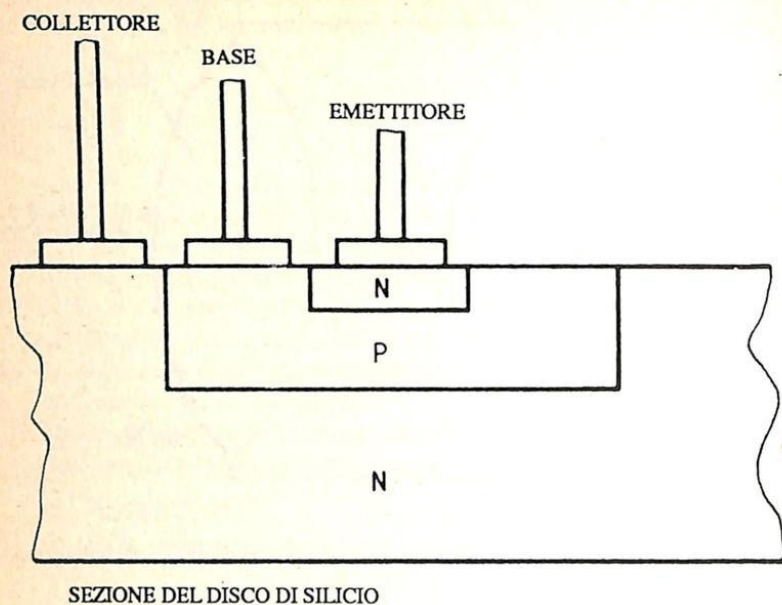


Fig. 17.-Schema della struttura di un transistor ottenuto con la tecnica planare.

- Tecnica planare.
- Tecnica planare-epitassiale.

La tecnologia per *lega* consiste nel porre due piccoli depositi del materiale che deve apportare lacune o elettroni (indio, arsenico, ecc.) su entrambi i lati di un sottile disco del materiale base (germanio o silicio).

Questo insieme viene posto a temperatura elevata, e il materiale depositato si fonde *dissolvendosi* in quello preso come base. Raffreddandosi cristallizza e appaiono due regioni laterali che, con la centrale, costituiscono il transistor.

Il processo per *diffusione* consiste nel sottoporre un wafer o disco molto sottile di germanio o silicio che costituirà il collettore, drogato precedentemente di tipo P o N, alla diffusione di un secondo materiale allo stato gassoso.

Così si ottiene la base con uno spessore dell'ordine di un micron. Su questa si costruisce l'emettitore con il metodo per lega o mediante una seconda diffusione.

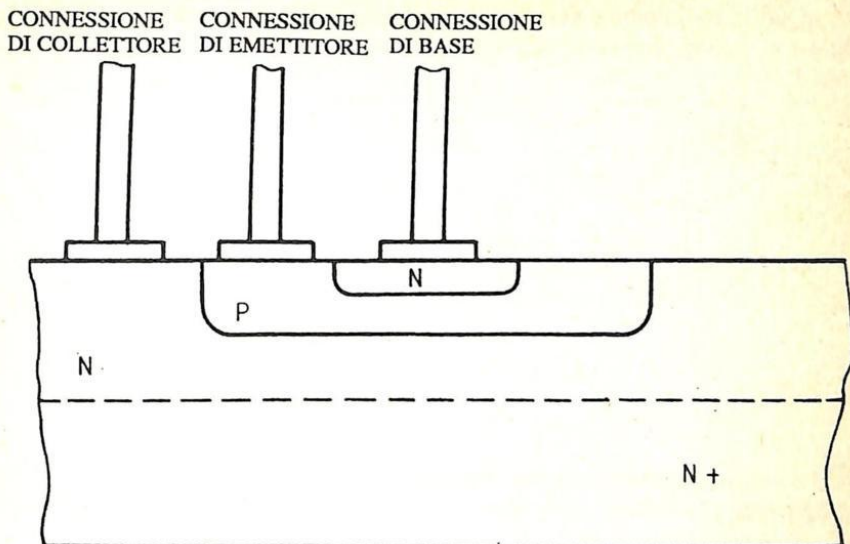


Fig. 18.-Sezione schematica di un transistor costruito con la tecnologia planare-epitassiale.

La tecnologia *planare* è basata su un procedimento fotochimico sviluppato ad alta temperatura.

Si parte da un disco di silicio N del diametro di 25 mm (da cui si otterranno circa 2.000 transistori) che costituirà il collettore. Lo si sottopone in seguito ad un trattamento termico e fotochimico, allo scopo di diffondere su di esso una certa quantità di boro o alluminio per formare la base di tipo P con uno spessore di circa 3 micron; su questo strato si realizza una nuova diffusione di fosforo o arsenico, ottenendo l'emettitore di tipo N.

Dopo aver preparato i contatti delle tre regioni (NPN), si tagliano e separano i transistori del disco originale, procedendo in seguito all'incapsulamento.

Nella tecnica *planare-epitassiale* si parte da un disco di silicio molto drogato con materiale N, su cui viene depositato un fine strato di silicio di tipo N, meno drogato del precedente, che costituirà il collettore. Su questo strato si diffonde un materiale di tipo P per generare la base e, mediante una seconda diffusione su questa con materiale N, si ottiene l'emettitore. Si differenzia dal processo planare solo per lo strato sottile (epitassiale) che costituisce il collettore.



Queste tecnologie sono anche utilizzate per la fabbricazione dei diodi, benchè in questo caso si termini il processo quando si ottiene la prima giunzione P-N.

## I TRANSISTORI UNIPOLARI



Oltre ai transistori bipolari, già descritti, che lavorano con cariche positive (lacune) e negative (elettroni), ne esistono altri che operano unicamente con correnti di lacune o di elettroni.

Verranno di seguito trattati i quattro tipi più utilizzati in pratica, vale a dire:

- Transistori FET.
- Transistori MOS. *FET*
- Transistori VMOS.
- Transistori UJT (unigiunzione).

*Transistori FET*

I transistori FET (Field-Effect-Transistor cioè transistori ad effetto di campo) realizzano la funzione di controllo della corrente, comune a tutti i transistori poichè costituisce la loro caratteristica fondamentale, mediante una tensione applicata ad uno dei loro terminali.

Vengono costruiti con una zona semiconduttrice di tipo P o N che unisce due dei suoi tre terminali, detti *Source* e *Drain*.

In questa regione, chiamata *canale*, ne esiste un'altra di segno opposto, collegata al terzo terminale o *Gate*; tra le regioni si forma quindi una giunzione P-N o N-P.

Tutto l'insieme suddetto è costruito su un semiconduttore dello stesso segno di quello del Gate, il quale formerà un'altra giunzione con il canale e sarà elettricamente collegato al terminale di Gate.



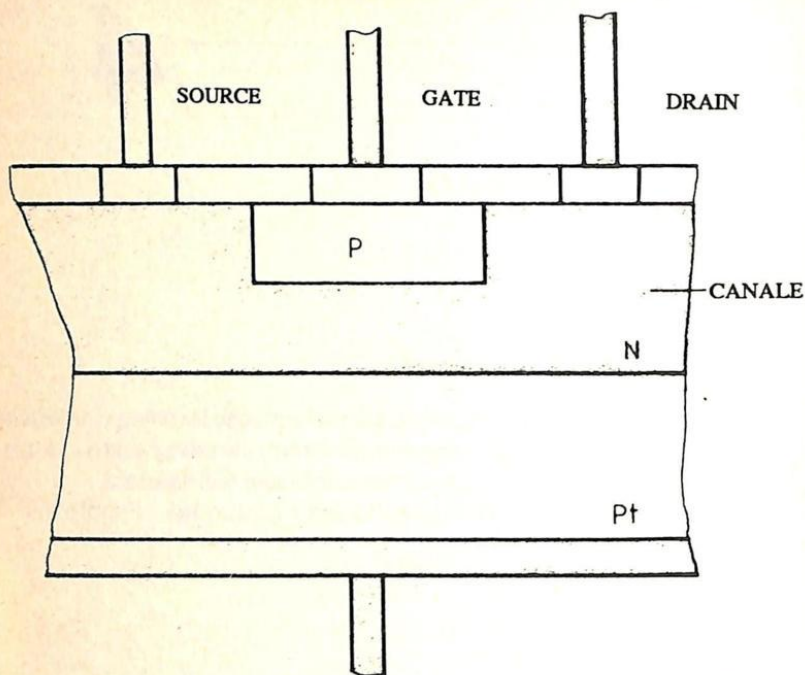


*Fig. 1.-Struttura interna di un transistor FET. Si possono osservare le diverse regioni che lo costituiscono.*

Applicando una tensione tra Drain e Source, circolerà corrente attraverso il canale. Se ora si applica un'altra tensione al Gate, in modo che si polarizzino inversamente le giunzioni P-N, si produrrà un restringimento del canale, con aumento della resistenza dello stesso e conseguente variazione dell'intensità di corrente che vi circola.

La corrente di Gate sarà estremamente debole trattandosi di una giunzione polarizzata inversamente.

Quindi si osserva, che è possibile variare la corrente che circola nel transistor con una tensione variabile di controllo, senza che sia necessario assorbire corrente da essa. Questo effetto è molto simile al funzionamento di una valvola a vuoto tipo il triodo, e può essere sfruttato per amplificare.

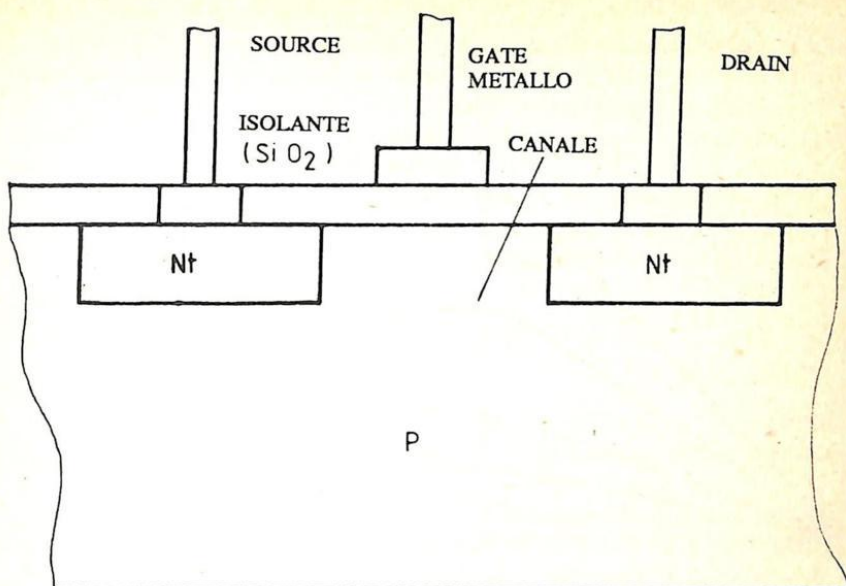


Fig. 2.-Struttura interna di un transistor MOS. Sono rappresentate le regioni di cui si compone.

## Transistori MOS

Un altro transistor ad effetto di campo è quello denominato MOS o MOS FET, nomi formati con le iniziali degli elementi che lo costituiscono e che sono: una regione semiconduttrice (S), un isolante elettrico costituito da biossido di silicio (O) ed una sottile pellicola metallica (M).

Vengono costruiti partendo da un semiconduttore di tipo P, su cui si diffondono due regioni di tipo N per formare il Source e il Drain. Sulla superficie di questa struttura viene accresciuto uno strato di biossido di silicio ( $\text{SiO}_2$ ) molto isolante, e su questo viene evaporato uno strato metallico che fungerà da Gate. Tra il Source e il Drain esisterà un canale simile a quello del FET, la cui larghezza o resistenza verrà controllata mediante la tensione di Gate, che avrà un comportamento generale simile a quello dei FET.

Il comportamento dei transistori ad effetto di campo è identificato dalle loro curve caratteristiche, in cui si rappresenta la corrente che entra o esce dal Drain ( $I_D$ ) in funzione della tensione applicata tra questi e il Source ( $V_{DS}$ ).

Viene tracciata una curva per ciascuno dei valori della tensione Gate-

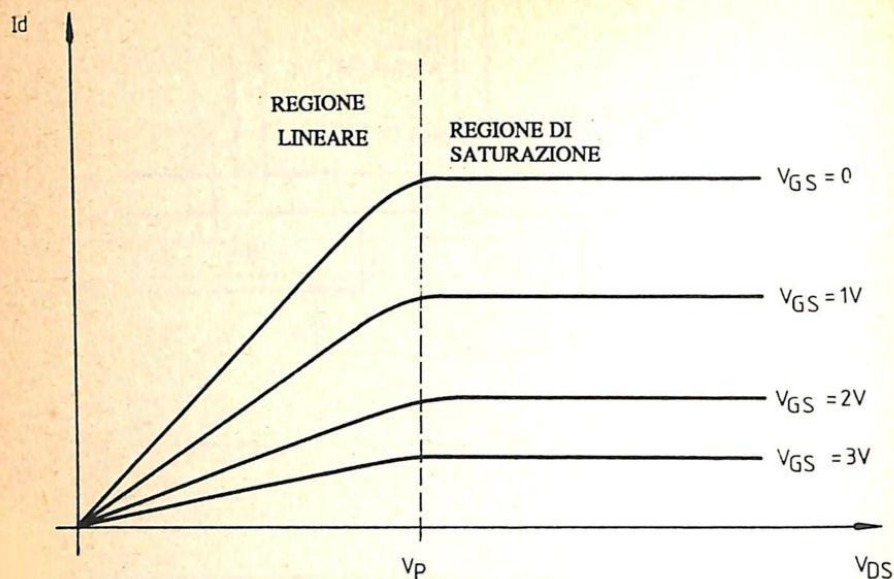


Fig. 3.-Curve caratteristiche di un transistor FET. Sono rappresentate per diverse tensioni di gate.

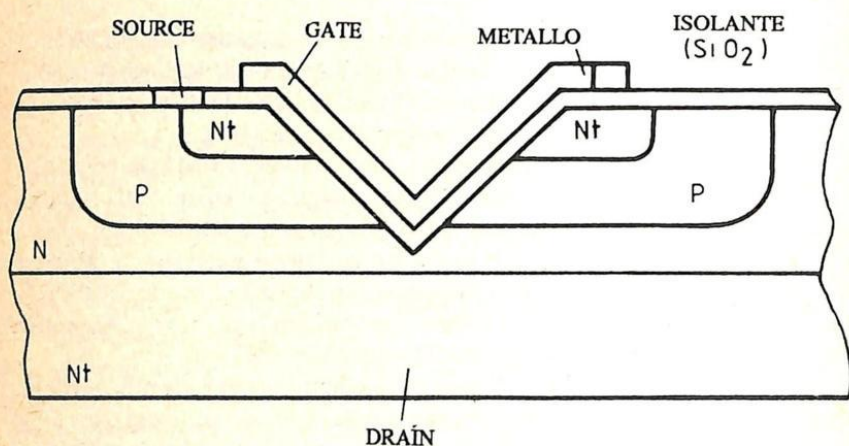


Fig. 4.-Struttura di un transistor VMOS.



Source ( $V_{GS}$ ) che si desidera.

Sulle curve si notano due zone: in quella più vicina all'origine, la corrente cresce con la tensione, però quando questa raggiunge il valore  $V_p$  o tensione di *pinch-off*, diventa costante ed a partire da questo punto si ha la seconda zona. La prima zona rappresenta la regione lineare, mentre la seconda rappresenta la regione di saturazione.

Questi transistori possono essere impiegati nei circuiti con configurazioni simili a quelle dei bipolari, cioè con Source comune, Gate comune e Drain comune, benchè la prima e l'ultima siano le più utilizzate in pratica.

## Transistori VMOS

Recentemente è comparsa sul mercato una nuova tecnologia costruttiva dei transistori MOS, che prende il nome di VMOS a causa della diversa struttura geometrica delle sue regioni semiconduttrici.

Lo schema di un transistor VMOS differisce da quello del MOS convenzionale (nel quale Source, Gate e Drain si trovano nella zona superficiale del dispositivo) per il fatto che la sua struttura assomiglia a una piramide invertita incisa sul semiconduttore.

Inoltre, assomiglia anche leggermente a quella dei transistori bipolari, perchè il Source si trova nella zona superiore e il Drain in quella inferiore di detta struttura.

Il Gate si costruisce ai lati della fenditura a forma di V, posta tra il Source e il Drain.

Si usano negli amplificatori di potenza, così come in commutazione, con funzione di interruttori grazie alla bassa resistenza interna posseduta.

## Transistori UJT

Si può chiamare *transistore* qualsiasi altro dispositivo semiconduttore la cui resistenza possa essere controllata con l'ausilio di una tensione e/o una corrente su uno dei suoi terminali.

Questo è il caso dei transistori detti *unigiunzione* (in inglese *unijunction transistor* abbreviato comunemente in UJT). Tali dispositivi sono costituiti internamente da una barra di materiale semiconduttore (generalmente silicio di tipo N), alle cui estremità sono posti due contatti definiti *basi*, che si indicano normalmente con B1 e B2.

In un punto della barra, intermedio tra le basi, viene connesso un terzo terminale, in modo che il contatto formi una giunzione semiconduttrice, o giun-

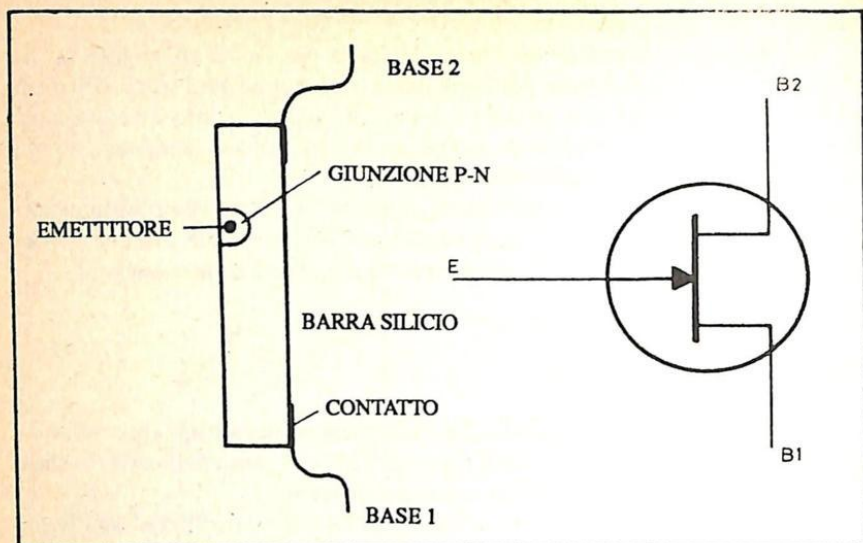


Fig. 5.-Struttura di principio di un transistor unigiunzione, e simbolo utilizzato per rappresentare lo stesso.

zione P-N; il nuovo contatto corrisponde alla zona P e la barra alla zona N.

Questo terminale si dice *emettitore*, ed il contatto funziona realmente come un *diodo* (anodo nell'emettitore, catodo sulla barra).

Tra l'emettitore e ciascuna delle basi, la barra di silicio presenta una certa resistenza elettrica, indicata generalmente con  $R_{B1}$  e  $R_{B2}$ , e la loro somma è uguale alla resistenza elettrica complessiva presente tra le due estremità ( $R_{BB}=R_{B1}+R_{B2}$ ).

Per un dato transistor, il rapporto tra  $R_{B1}$  e  $R_{BB}$  sarà fisso.

Questo quoziente si dice di solito *rapporto intrinseco di stand-off*, e il suo valore viene fornito dal costruttore. Si indica con  $\eta=R_{B1}/R_{BB}$ .

### Funzionamento dell'UJT

Quando tra le basi si applica una certa tensione (ad esempio 15 V), attraverso la barra semiconduttrice circolerà una certa corrente, il cui valore dipende dal modello di transistor impiegato.

La tensione, lungo la barra, varierà da 0 V in B1 fino a 15 V in B2, essendo la tensione corrispondente all'emettitore  $\eta$  volte quella applicata tra le

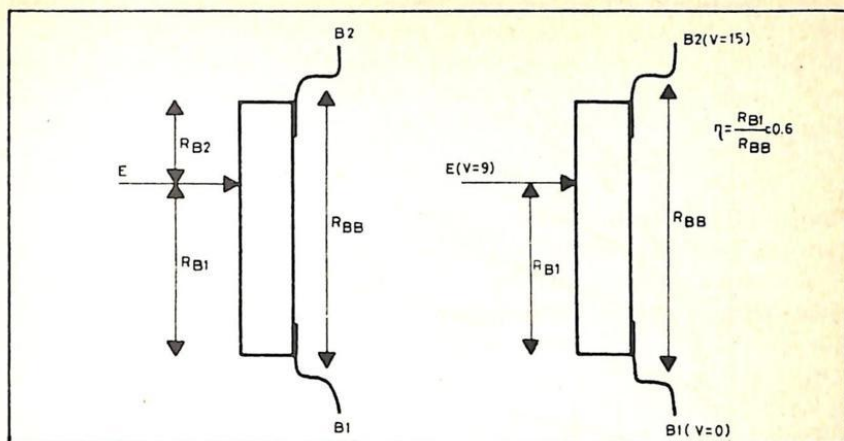


Fig. 6.-Funzionamento sotto tensione del transistor UJT.

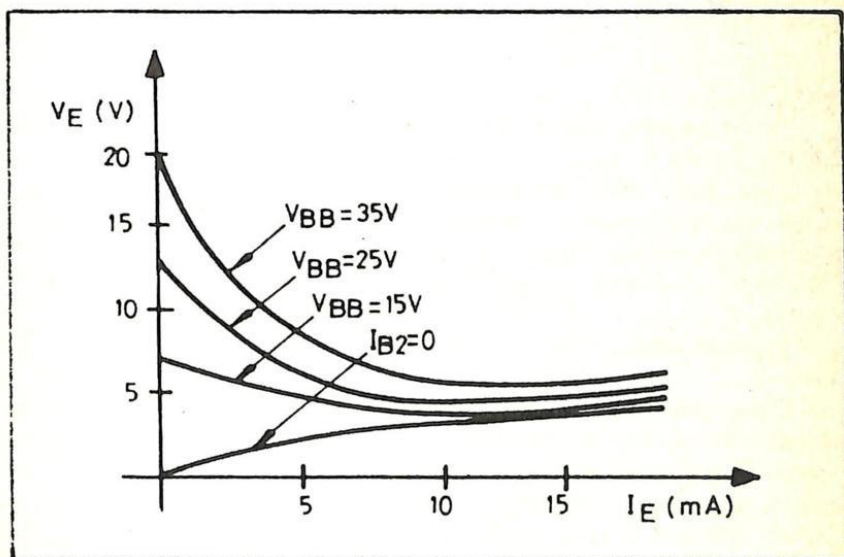


Fig. 7.-Curve di ingresso dell'UJT, espresse come relazione tra la corrente e la tensione di emettitore.



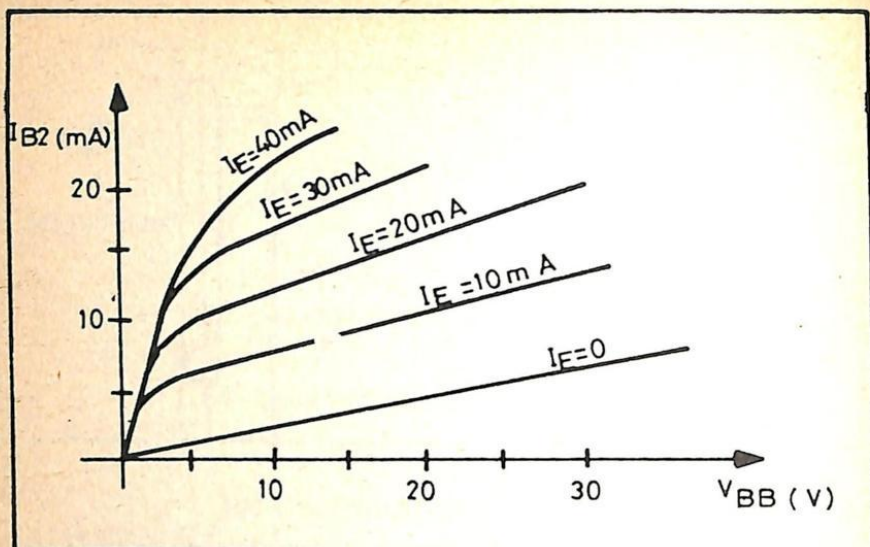


Fig. 8.-Curve di uscita dell' UJT. Si tratta della relazione tensione-corrente tra le basi del transistor.

basi.

Se, ad esempio,  $\eta$  ha un valore di 0,6, la tensione su detto terminale sarà di  $0,6 \times 15 = 9$  V.

Dato che il contatto sulla barra può essere visto come il catodo di un diodo, e su tale catodo esiste una tensione di 9 V, finchè sul terminale di emettitore (anodo dello stesso diodo) non si applica una tensione superiore a questi 9 V, il diodo non entrerà in conduzione e attraverso l'emettitore non circolerà corrente.

In questa situazione si dice che il transistor unigiunzione è *in interdizione*.

Quando la tensione esterna applicata all'emettitore supera quella di conduzione del diodo interno (un 9,6 V, per l'esempio fatto), comincia a circolare corrente attraverso questo terminale, e l'insieme emettitore-base 1 si comporterà come un diodo semiconduttore normale, per cui la tensione sull'emettitore diventerà di valore molto basso (quella di soglia di un diodo al silicio, circa 0,6 V).

Finchè dura questa transizione, si dice che il transistor è nella *zona di resistenza negativa*, poichè a un aumento della corrente corrisponde una dimi-

nuzione della tensione.

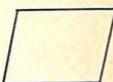
Quando nel transistor si è stabilizzata la corrente di emettitore, la situazione rimane stabile e si dice che è *saturato*. Questa situazione permane finchè la corrente di emettitore si abbassa ad un valore tale che il transistor torna alla sua situazione primitiva (regione di interdizione).

Nella figura 7 sono visibili le *curve di ingresso* di un UJT, o relazione tra corrente e tensione di emettitore.

La figura seguente mostra le *curve di uscita* o relazione tensione-corrente tra le basi del transistor. Si può vedere che la resistenza (rapporto tra la tensione e la corrente) del dispositivo semiconduttore può essere variata con la corrente di emettitore; per questo a tale dispositivo si può applicare la denominazione generica di *transistore*.







## IL TIRISTORE



Il tiristore è un componente semiconduttore progettato per realizzare funzioni di interruttore o di raddrizzatore controllato.

Il suo funzionamento è simile a quello di un diodo, poichè permette il passaggio della corrente in un unico senso di circolazione; tuttavia si differenzia da questo per il fatto che la sua conduzione è controllata dall'azione di uno degli elettrodi che possiede.

*Struttura*

La sua struttura è formata da quattro regioni semiconduttrici p-n-p-n, in cui la prima costituisce l'anodo, l'ultima il catodo e le intermedie il *gate*, che ha la funzione di *innescare* o mandare in conduzione il componente.

Questa struttura si può dividere, allo scopo di analizzare il suo comportamento, in due parti, ciascuna delle quali forma un transistor. In questo modo esisteranno un transistor P-N-P, costituito dall'anodo e dalle due regioni seguenti, ed un altro transistor di tipo N-P-N che comprende il catodo assieme alle due regioni precedentemente considerate. Questi due transistori saranno uniti elettricamente nelle zone seguenti:

- La base del P-N-P con il collettore dell'N-P-N.
- Il collettore del P-N-P con la base dell'N-P-N e con l'elettrodo di *gate*.

Il circuito ottenuto forma una struttura fortemente rigenerata, poichè qualsiasi segnale si applichi al *gate* sarà amplificato, e uscirà dal collettore del transistor N-P-N, raggiungendo la base del P-N-P e amplificandosi nuovamente nel collettore di questo, che coincide con il terminale di *gate*. Allora il com-

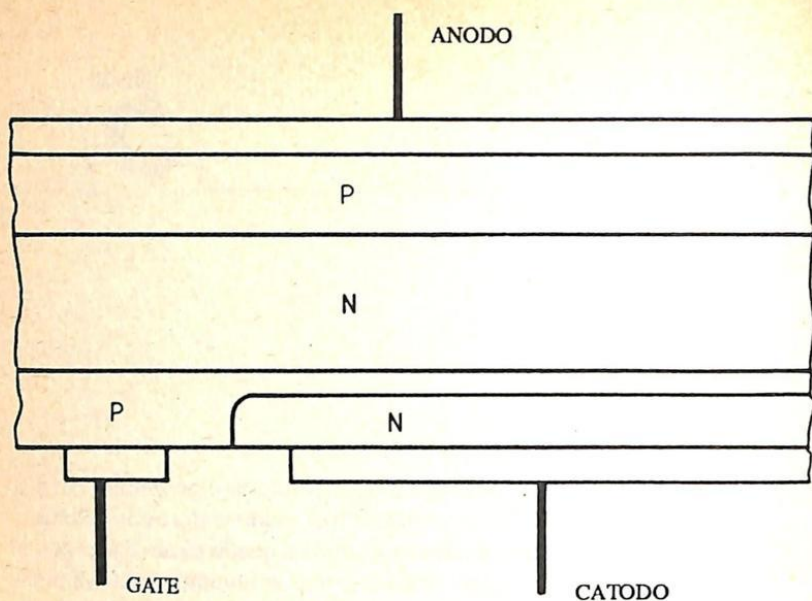


Fig. 1.-Struttura delle quattro regioni semiconduttrici di un tiristore.

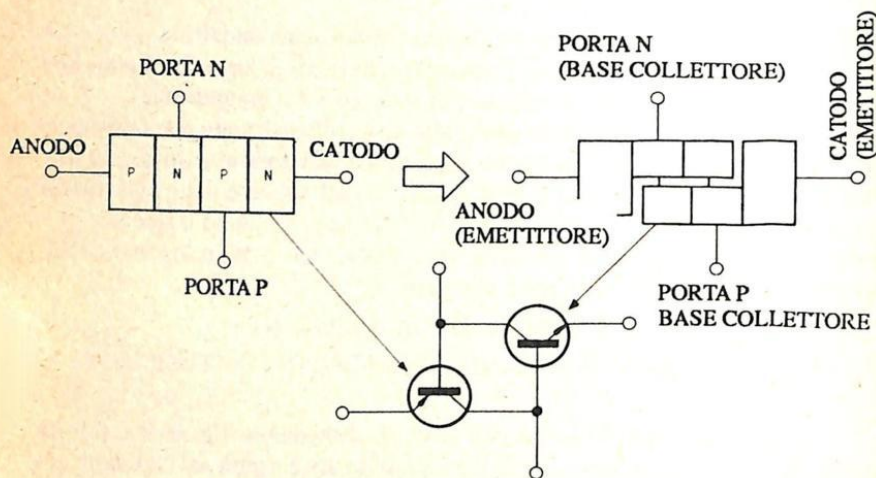


Fig. 2.-Equivalenza tra tiristore e transistore.



ponente entrerà rapidamente in saturazione, e potrà circolare una corrente elettrica tra l'emettitore del transistor P-N-P, che coincide con l'anodo, e l'emettitore N-P-N che costituisce il catodo dell'elemento.

## *Innesco*

Da quanto sopra, si deduce che l'inizio della conduzione del tiristore dipende dal segnale che è stato applicato al suo gate, mentre non ne dipende la sua permanenza in questo stato, dato che è la rigenerazione propria, interna al dispositivo, quella che lo mantiene in conduzione. Pertanto il segnale del gate potrà essere soppresso senza che vi sia alcuna influenza su detta conduzione; il dispositivo rimane *innescato*. Oltre al tipo di *innesco* precedente, ne esistono altri che conviene conoscere, poichè possono essere utili in qualsiasi applicazione di questo componente.

I diversi tipi di *innesco* sono i seguenti:

- Tensione: aumentando la tensione collettore-emettitore di un transistor, si può arrivare a provocare la conduzione per effetto valanga. Con questo metodo si raggiunge una situazione simile a quella descritta in precedenza, per effetto della rigenerazione interna, che porta il tiristore in conduzione.
- Variazione rapida della tensione: se la tensione anodo-catodo varia bruscamente, si ottiene una trasmissione di detta variazione all'interno del componente, a causa di un effetto capacitivo, e da questa parte il processo rigenerativo di *innesco*.
- Temperatura: l'effetto della temperatura su un transistor è quello di aumentare la corrente di deriva del collettore. Nel momento in cui si raggiunge la corrente sufficiente per iniziare la rigenerazione, il tiristore passerà in conduzione.
- Innesco causato dal segnale di gate: questa è la forma più comune di innesco.
- Luce: nel caso di fototiristori, si può produrre un *innesco* per mezzo di luce incidente.

## *Controllo della corrente*

Si osservi che, nonostante i tiristori possiedano certe analogie con i transistori, ne differiscono in tutto quanto riguarda il controllo della corrente che



in essi circola. Mentre con un transistor questa corrente è controllata dall'azione della *base*, in un tiristore non esiste alcun controllo sulla stessa dopo il momento iniziale di *innesco*.

E' giusto, pertanto, definire qualche procedimento di blocco del tiristore, in modo che possa essere controllato da qualcuno dei meccanismi di *innesco* descritti. Questo procedimento consiste nell'applicare tra anodo e catodo una tensione inversa, con il negativo sull'anodo e il positivo al catodo. In questo modo il tiristore entrerà in blocco in un breve periodo di tempo detto *tempo di blocco* o in inglese *turn-off time*. La tensione inversa potrà in seguito essere eliminata, ed il componente si manterrà nella situazione acquisita.

### Curve caratteristiche

Il funzionamento del tiristore è perfettamente definito dalle sue curve caratteristiche, nelle quali si rappresenta sull'asse verticale la corrente e su quello orizzontale la tensione anodo-catodo. Di solito, si disegnano diverse curve per diversi valori della tensione di *innesco* del *gate*.

Le curve presentano tre zone caratteristiche: la prima, situata a sinistra, con tensioni inverse tra anodo e catodo, mostra il punto di massima tensione perchè il dispositivo subisca l'effetto valanga inverso; questa prima zona si

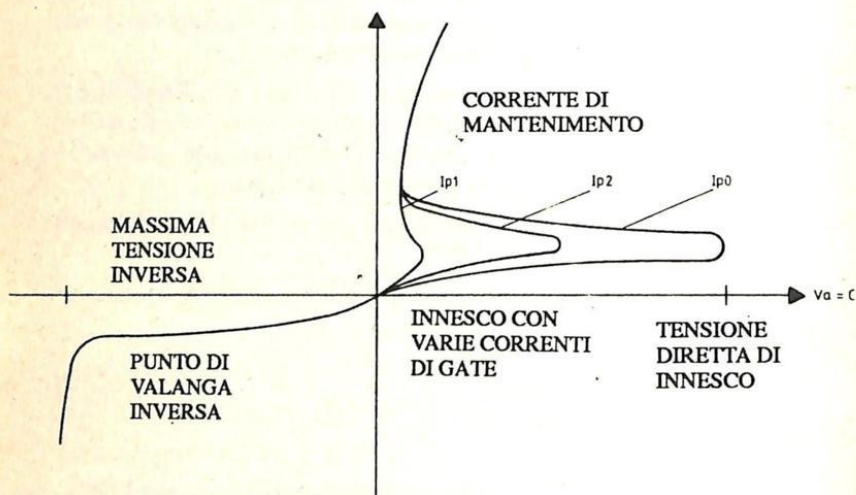


Fig. 3.-Curve caratteristiche di un tiristore.

estende verso destra con i vari punti di innesco per diverse correnti di *gate*, fino a giungere all'*innesco* per tensione diretta. La seconda zona è quella di *innesco* propriamente detto, in cui si osserva un fenomeno molto curioso di resistenza negativa, poichè una diminuzione di tensione provoca un aumento di corrente. La terza zona è quella della corrente di mantenimento con bassa tensione anodo-catodo, limitata solo dalla massima dissipazione di potenza del tiristore.

## Applicazioni

Le applicazioni dei tiristori si estendono dal raddrizzamento di correnti alternate, al posto dei diodi convenzionali, fino alla realizzazione di determinate commutazioni di bassa potenza nei circuiti elettronici, passando per gli oscillatori o invertitori che trasformano la corrente continua in alternata.

Il principale vantaggio che offrono, rispetto ai diodi, quando li si utilizza come raddrizzatori, è costituito dal fatto che il momento in cui entrano in conduzione può essere controllato dal segnale di *gate*. In questo modo si potrà variare la tensione continua di uscita, variando l'istante dell'*innesco*, dato

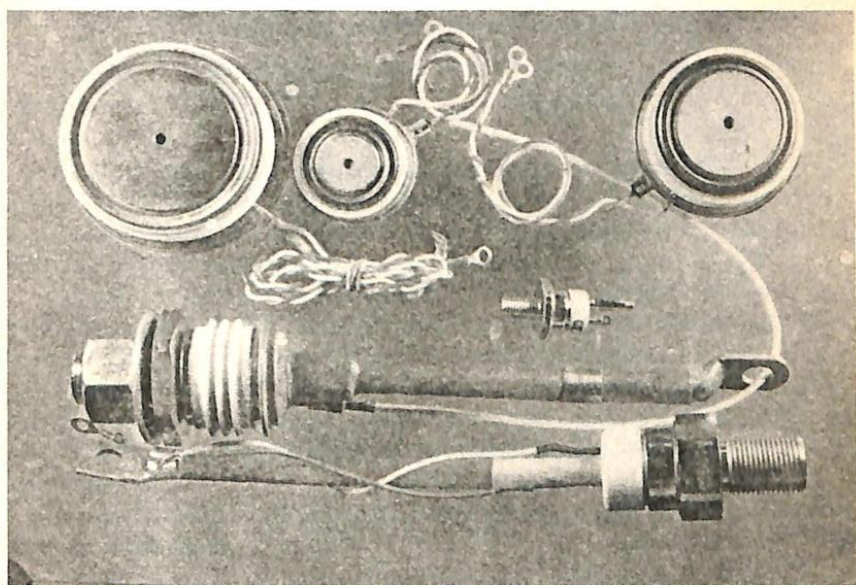


Fig. 4.-Gruppo di tiristori con diversi tipi di contenitori.



che si possono ottenere diversi angoli di conduzione del ciclo della tensione o corrente alternata di ingresso. Inoltre il tiristore si bloccherà automaticamente, al variare dell'alternanza da positiva a negativa, poichè in tale momento inizierà a ricevere tensione inversa. Le caratteristiche che definiscono un tipo qualsiasi di tiristore sono le seguenti:

- $I_{T(RMS)}$ : Massima corrente diretta efficace anodo-catodo.
- $I_{T(AV)}$ : Massima corrente media diretta anodo-catodo.
- $V_{TM}$ : Caduta di tensione anodo-catodo.
- $V_{RRM}$ : Massimo valore di picco della tensione inversa ripetitiva anodo-catodo.
- $V_{FRM}$ : Tensione diretta massima che si può applicare senza raggiungere l'innesco.
- $I_{GT}$ : Corrente minima di gate per l'innesco.
- $I_{GD}$ : Corrente massima di gate che si può applicare senza raggiungere l'innesco.
- $V_{GT}$ : Tensione di gate necessaria per produrre la corrente di innesco.
- $V_{GTmax}$ : Tensione massima di gate per l'innesco.
- $V_{GTmin}$ : Tensione minima di gate per garantire la corrente di innesco.



*IL TRIAC***I**

l componente semiconduttore detto TRIAC è nato come conseguenza della necessità di disporre di un interruttore controllato, con caratteristiche simili a quelle del tiristore, il cui campo di azione si estendesse alla corrente alternata.

La parola TRIAC è un'abbreviazione del suo nome inglese (*Triode AC*) o triodo in corrente alternata, e dispone di tre elettrodi per il suo funzionamento.

*Struttura del TRIAC*

La sua struttura interna è costituita da due sistemi interruttori, uno P-N-P-N e l'altro N-P-N-P, collegati in parallelo, e ognuno di essi risulta simile a un tiristore. Pertanto assomiglia in un certo modo alla disposizione che si otterrebbe collegando due tiristori in antiparallelo.

Nella figura 1 si può osservare il disegno della struttura, con i due elettrodi principali T1 e T2, che in questo caso perdono la denominazione di anodo e catodo, lavorando con la doppia polarità della tensione alternata.

Sotto al terminale T2, e connesse allo stesso, si incontrano due regioni, una *P* e l'altra *N*; scendendo verso il terminale T1 esistono una regione *N*, un'altra *P*, ed una finale *N* unita elettricamente alla *P* sovrastante, mediante la connessione di T1.

A sinistra si vede un'altra regione *N* per la connessione del *gate* di ingresso del dispositivo.

Il terminale T1 è quello che si prende come riferimento per la misura delle tensioni e correnti dei terminali T2 e di *gate*.

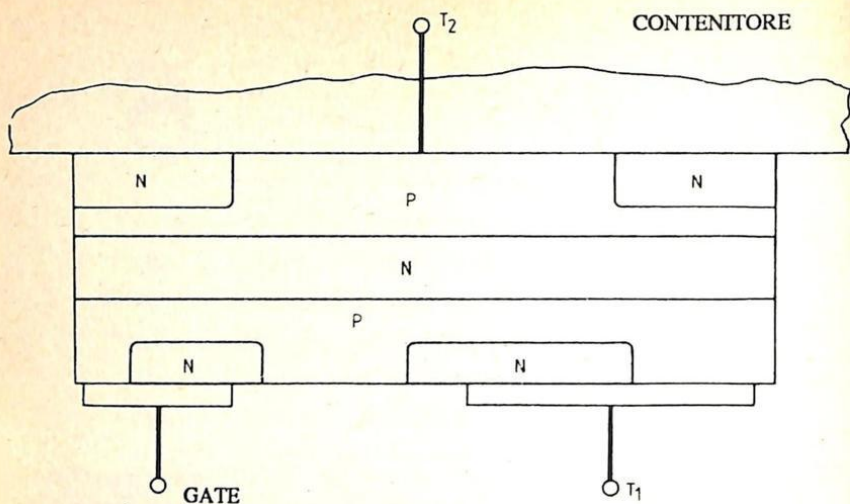


Fig. 1.-Struttura interna di un triac in cui si osservano tutte le regioni semiconduttrici che contiene.

### Curve caratteristiche

Le curve caratteristiche sono simili a quelle del tiristore, quando questo lavora con polarizzazione diretta, ma si estendono alla zona in cui sia la corrente che la tensione sono negative, con un forma simile, benchè opposta, alle prime.

Sulle curve si osserva la tensione massima che può sopportare il componente senza entrare in conduzione, fatto che definisce automaticamente la tensione massima alternata di picco che può essere controllata.

### Innesco

L'innesco del TRIAC si ottiene applicando una corrente all'elettrodo di gate, con un'ampia gamma di possibilità di selezionare il tipo di innesco desiderato.

In effetti lo si può ottenere applicando una corrente continua, una corrente pulsante proveniente da un raddrizzatore, una corrente alternata o un treno di impulsi generati dai dispositivi di controllo.

I diversi metodi di innesco si possono riassumere nei seguenti, prenden-

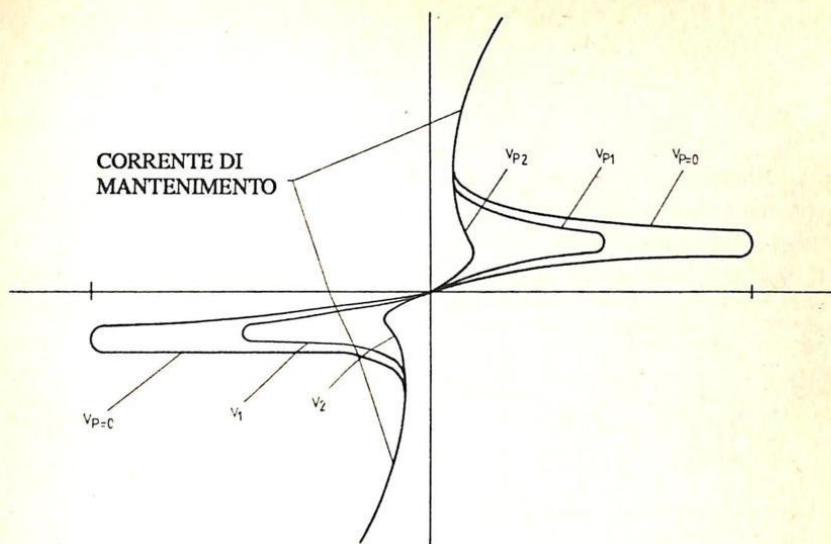


Fig. 2.-Curve caratteristiche corrente-tensione T1-T2 per varie correnti di gate.

do sempre come riferimento il terminale T1:

- a) Terminale T2 positivo: tensione di innesco di gate positiva, che provoca una corrente entrante da questo terminale, il cui senso si considera positivo.
- b) Terminale T2 positivo: tensione di innesco di gate negativa, corrente di gate negativa.
- c) Terminale T2 negativo: tensione di innesco di gate positiva, corrente di gate positiva.
- d) Terminale T2 negativo: tensione di innesco di gate negativa, corrente di gate negativa.

Anche se da un punto di vista teorico le quattro possibilità esposte sono perfettamente funzionali, si ottiene la miglior sensibilità del TRIAC con i metodi di innesco *a* e *d*.

Il metodo di innesco indicato con *b* fornisce una sensibilità minore, che diventa ancora inferiore se si utilizza il metodo *c*.

Quest'ultimo metodo di innesco non dovrà essere utilizzato e, se per qualsiasi necessità di progetto fosse indispensabile, occorrerà scegliere qual-



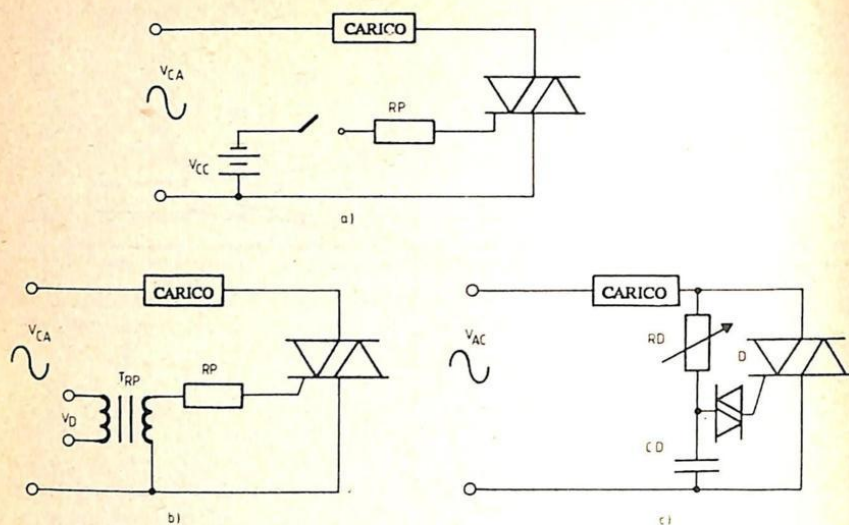


Fig. 3.-Diversi modi di innescare un triac: a) mediante la corrente continua  $V_{CC}$  applicata attraverso  $R_P$ . b) con l'alternata del secondario di  $T_{RP}$ , quando al primario si applica la tensione di innescio  $V_D$ . c) mediante il diac  $D$ , collegato ad un circuito che può variare l'angolo di conduzione.

che tipo di TRIAC particolarmente adatto allo scopo.

La differenza più importante che si incontra nel funzionamento di un TRIAC, rispetto ad un tiristore, è che, in quest'ultimo caso, ciascuno dei dispositivi condurrà per metà ciclo, se lo si innescia adeguatamente, bloccandosi quando la corrente cambia di polarità ed ottenendo come risultato la conduzione completa di corrente alternata.

Il TRIAC, tuttavia, si blocca dal breve istante in cui la corrente di carico passa per il valore zero, fino a che si supera il valore minimo di tensione tra  $T_1$  e  $T_2$ , momento in cui torna a condurre nuovamente, supposto che l'eccitazione del gate sia adeguata.

Questo implica la perdita di un piccolo angolo di conduzione che, nel caso di carichi resistivi in cui la corrente è in fase con la tensione, non crea alcun problema.

Nel caso di carichi reattivi si deve tener conto, nel progetto del circuito, che nel momento in cui la corrente passa per lo zero non coincide con lo stato della tensione applicata, esistendo in tali istanti degli impulsi di tensione tra

i due terminali del componente.

## *Applicazioni più comuni*

La versatilità del TRIAC e la sua semplicità d'uso, lo rende ideale per un'ampia varietà di applicazioni relative al controllo della corrente alternata.

Una di esse è l'utilizzazione come interruttore statico, che offre molti vantaggi sugli interruttori meccanici convenzionali, che richiedono sempre il movimento di un contatto; il più importante è quello che deriva dalla conseguenza che il TRIAC si blocca sempre a metà ciclo, quando la corrente passa per lo zero, per cui si evitano gli archi e le sovratensioni dovute alla commutazione di carichi induttivi, che accumulano una certa energia durante il loro funzionamento.

## *Innesco in continua e alternata*

Esiste un notevole numero di possibilità per ottenere, in pratica, l'innesco di un TRIAC, per cui si può scegliere quella che risulta più adatta al caso reale di cui si tratta. Si possono riassumere in due varianti principali:

- Innesco con corrente continua.
- Innesco con corrente alternata.

Nel primo caso la tensione di innesco proviene da una sorgente di alimentazione continua, applicata al TRIAC mediante una resistenza limitatrice della corrente di gate.

E' necessario disporre di un elemento interruttore in serie con la corrente d'innesco, con funzione di controllo, che può essere un semplice interruttore meccanico o un transistor che lavora in commutazione.

Questo sistema d'innesco è quello normalmente utilizzato nei circuiti elettronici, alimentati con tensioni continue, il cui compito sia quello di controllo di una corrente, a partire da un determinato segnale di eccitazione che generalmente si origina in un trasduttore di qualsiasi tipo.

Il sistema di innesco con corrente alternata si può realizzare mediante l'uso di un trasformatore che fornisca la tensione d'innesco, o anche direttamente a partire dalla tensione di rete, con una adeguata resistenza limitatrice della corrente di gate e qualche elemento interruttore che fornisca l'eccitazione al gate nel momento esatto.



## Il diac

Un componente molto utilizzato per ottenere l'innesco di un TRIAC è quello detto *diac* (dall'inglese *Diode AC*).

Questo dispositivo è costituito da una struttura interna simile a quella del TRIAC, ma senza elettrodo di gate, per cui l'unico modo per farlo entrare in conduzione è di applicare tra i suoi due terminali una tensione che superi il punto di innesco, e scenda successivamente ad un valore più basso o di mantenimento.

Lo si utilizza normalmente nei circuiti che effettuano un controllo di fase della corrente del TRIAC, in modo da applicare tensione al carico solo durante una frazione del ciclo della corrente alternata.

Questo metodo è impiegato per controlli di illuminazione con intensità variabile, riscaldamento elettrico con regolazione della temperatura, e in alcuni controlli di velocità dei motori.

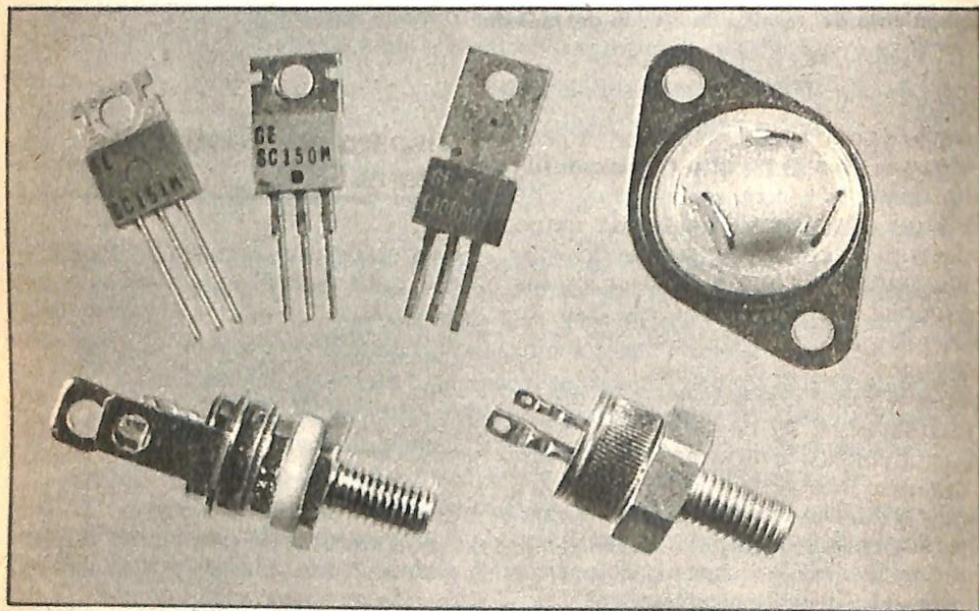


Fig. 4.-Famiglia completa di triac in cui si osservano i tipi menzionati.



## *Semplice circuito di innesco*

Il modo più semplice per realizzare questi controlli, è quello di utilizzare il circuito rappresentato nella figura 3 c), nel quale la resistenza variabile  $R_D$  carica il condensatore  $C_D$  fino a che si raggiunge la tensione di innesco del diac  $D$ ; in quel momento avverrà attraverso il diac la scarica di  $C_D$ , la cui corrente raggiunge il gate del TRIAC e lo manda in conduzione.

Questo innesco avviene una volta nel semiciclo positivo ed un'altra nel negativo. Il momento dell'innesco potrà essere regolato con il valore di  $R_D$ , variando di conseguenza il tempo di conduzione del TRIAC e, pertanto, il valore della tensione media applicata al carico, ottenendo così un semplice, ma efficace, controllo di potenza.



*I CIRCUITI INTEGRATI*

**L**a costruzione e lo sviluppo dei circuiti integrati, costituisce uno dei più grandi passi fatti dalla tecnologia elettronica negli ultimi venticinque anni.

La loro concezione si basa sulla sostituzione di tutto un complesso di componenti discreti, che realizzano una determinata funzione, con un componente unico, che comprende internamente tutto il necessario per riprodurre esattamente la stessa funzione. Tale componente contiene nel suo interno gli stessi componenti, in forma miniaturizzata, ed altri ancora; tuttavia, a parte le ridotte dimensioni, la differenza sta nel fatto che tutti questi, oltre ad essere chiusi in un contenitore comune, si trovano montati o costruiti su di un supporto sempre comune, detto substrato.

*Substrato semiconduttore*

I circuiti integrati, pertanto, sono costituiti da un blocco monolitico di materiale semiconduttore o substrato su cui, sfruttando le tecniche di diffusione delle impurezze P o N, si costruiscono le diverse parti con procedimenti molto simili a quelli impiegati nei semiconduttori discreti.

L'enorme riduzione di peso e volume, ottenuta con l'impiego dei circuiti integrati, ha permesso la miniaturizzazione dei circuiti elettronici classici, indispensabili nell'era spaziale, così come ha semplificato notevolmente la complessa circuiteria dei più potenti elaboratori elettronici.

Con l'utilizzazione dei circuiti integrati, si è prodotto un profondo cambiamento nel progetto e nella fabbricazione dei circuiti elettronici, poichè ciò esige una completa conoscenza dei componenti discreti e dei blocchi funzionali integrati, dato che entrambi appaiono combinati in qualsiasi apparecchiatura.



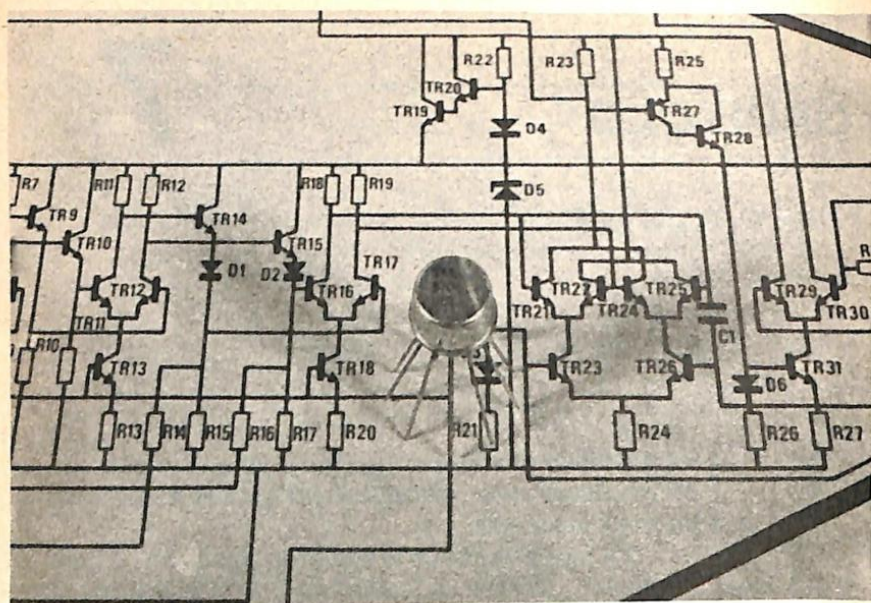


*Fig. 1.-Un circuito integrato contiene al suo interno un insieme di componenti interconnessi, per realizzare una determinata funzione, su un supporto comune detto substrato.*

tura moderna.

## *Costruzione*

Nella costruzione di un circuito integrato si parte da un disegno, sotto forma di schema elettrico, in cui sono contenuti tutti gli elementi da integrare, che sono di solito transistori, diodi, resistenze e in alcuni casi condensatori, benchè questi ultimi non vengano integrati frequentemente, in quanto si tende a metterli esterni all'integrato per montarli come qualsiasi altro componente discreto.

La creazione delle giunzioni semiconduttrici sul substrato è un procedimento già noto, perchè si esegue in modo molto simile a quello utilizzato per la fabbricazione di diodi e transistori.

La resistenze sono semplici da realizzare, poichè il semiconduttore presenta una resistività che si può regolare mediante una maggiore o minore quan-

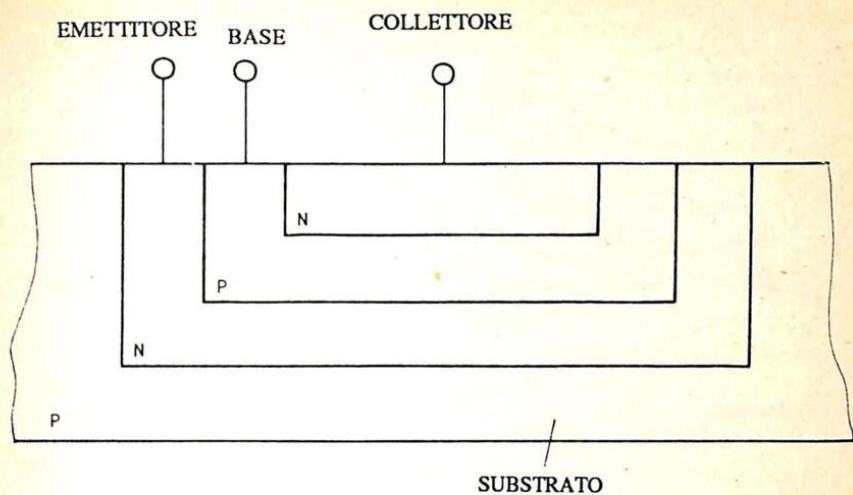


Fig. 2.-L'integrazione di un transistor bipolare si effettua mediante formazione di giunzioni semiconduttrici sul substrato.

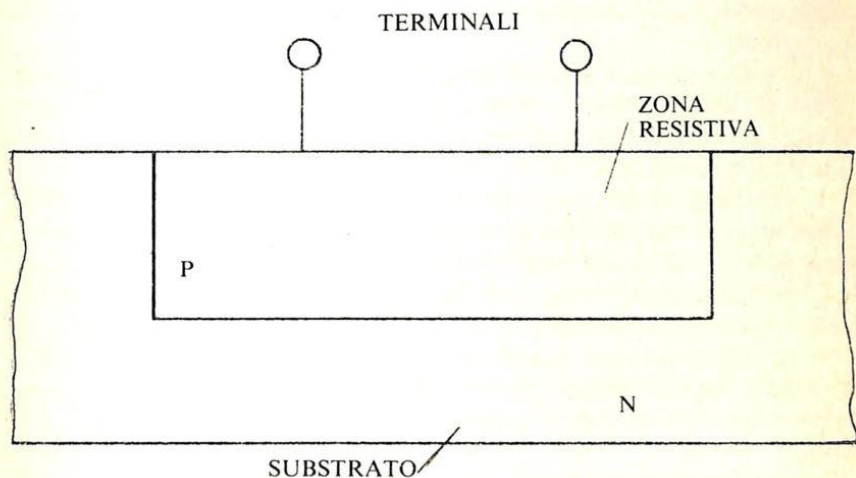


Fig. 3.-Integrazione di una resistenza sul substrato, mediante una zona di materiale P o N, di larghezza e lunghezza predeterminate.



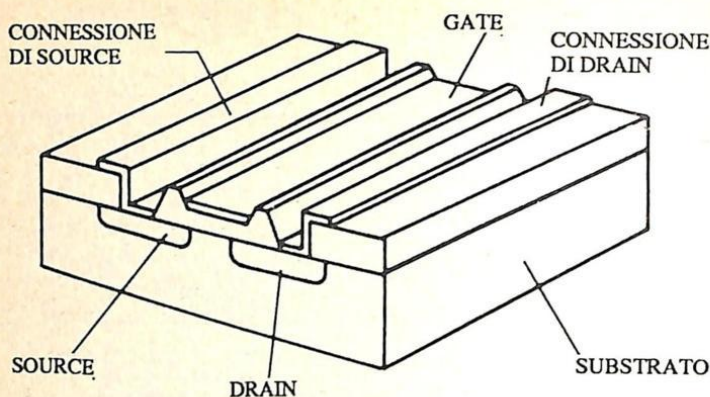


*Fig. 4.-Struttura interna dell'integrazione di un transistor P-MOS.*

tà di impurezze (P o N) aggiunte, per cui saranno costituite da zone di materiale con larghezza e lunghezza determinate, senza giunzioni intermedie.

L'integrazione di un condensatore è più complessa, poichè necessita di due zone conduttrici isolate con un dielettrico. Si può utilizzare una giunzione semiconduttrice polarizzata inversamente che, come si sa, si comporta allo stesso modo di un condensatore, con capacità definita dal livello della tensione applicata.

Un altro metodo è quello di utilizzare una struttura simile a quella di un transistor MOS, in modo che le armature del condensatore siano formate dallo strato metallico e dalla regione semiconduttrice, e il dielettrico dalla zona di ossido intermedio.

Le diverse regioni conduttrici e semiconduttrici che si realizzano nel circuito integrato hanno di solito un uso molteplici, poichè oltre a servire per un componente, si utilizzano anche come collegamento elettrico e formazione di strati per un altro componente, collegato al precedente, non esistendo alcun altro metodo di interconnessione.

Nei casi in cui sia necessario isolare due parti di uno stesso substrato si ricorre, di solito, all'applicazione di tensioni inverse, ad esempio polarizzando il substrato alla tensione più negativa se è di tipo P, o alla più positiva se è di tipo N.

In questo modo il substrato avrà sempre una tensione inversa rispetto a qualsiasi altra regione contigua, per cui si otterrà l'isolamento necessario, anche se, a volte, si ha la necessità insopprimibile di creare zone isolanti che se-



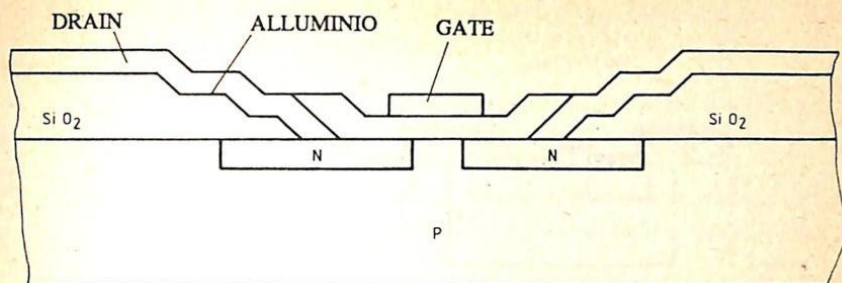


Fig. 5.-Sezione schematica di un transistor integrato secondo la tecnologia N-MOS.

parino le regioni.

### *Tecnologie di costruzione*

Attualmente esistono diverse tecnologie per la costruzione dei circuiti integrati, tra le quali se ne evidenziano due molto importanti, poichè a partire da queste si ottiene la stragrande maggioranza dei circuiti utilizzati a livello mondiale, che sono le seguenti:

- Tecnologia bipolare.
- Tecnologia MOS.

Per la bipolare si parte da una barra o lingotto di silicio di 2 o 3 cm di diametro, da cui si ricavano dei wafer dello spessore di circa 30 micron (1 micron = 0,001 mm), che vengono puliti e preparati perchè possano costituire il substrato o supporto laminare per il circuito.

Sul wafer di base si realizza la diffusione selettiva degli strati di tipo P o N, necessari per formare le varie regioni. Per fare ciò, si ossida la superficie del wafer in un forno, alla temperatura di circa 1.200°C, in modo che si formi uno strato di biossido di silicio ( $\text{SiO}_2$ ), il cui compito sarà quello di evitare la diffusione sull'area coperta.

In seguito, mediante un procedimento fotolitografico, si selezionano le aree che devono essere sottoposte a diffusione, in modo che le rimanenti rimangano ricoperte da uno strato di emulsione resistente all'azione degli acidi. Il wafer così ottenuto, viene successivamente immerso in un acido che elimina l'ossido di silicio dalle zone non ricoperte dall'emulsione, lasciando scoperte esclusivamente le zone di silicio che devono essere sottoposte al pro-

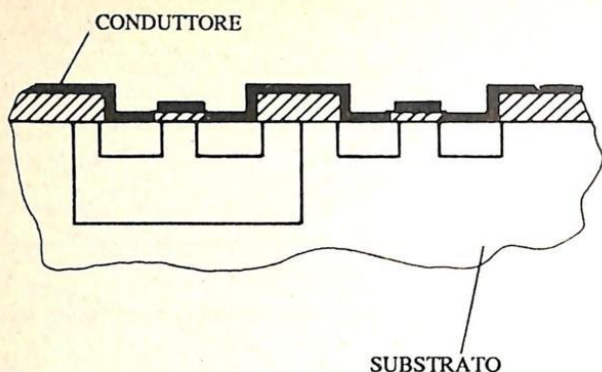


Fig. 6.-Sezione schematica di un transistor realizzato mediante tecnologia complementare C-MOS.

cesso di diffusione.

Questo procedimento si ripete tante volte quante sono necessarie per ottenere le diverse regioni semiconduttrici, il che richiede l'utilizzo di varie *maschere* fotografiche che selezionino in ciascuna fase del processo le superfici destinate alla diffusione.

La tecnologia MOS è basata sullo stesso principio costruttivo dei transistori MOS.

Si parte da un wafer semiconduttore di tipo N (o P), e sulla sua superficie si diffondono due regioni P (o N) che costituiscono il *source* e il *drain*, con una profondità da 2 a 4 micron. Su questa struttura viene formato successivamente uno strato di biossido di silicio, sottoponendola ad ossidazione controllata ad alta temperatura, che costituisce la regione isolante (O); su essa si farà evaporare uno strato di alluminio dello spessore di 1 o 2 micron, che forma la regione metallica (M) corrispondente al *gate*.

Un aspetto importante dei dispositivi MOS è che rimangono autoisolati durante il funzionamento normale, per il fatto che le loro giunzioni sono inversamente polarizzate, cosa che evita la necessità di realizzare diffusioni di isolamento, aumentando in questo modo la densità di integrazione.

I circuiti integrati MOS vengono costruiti con tre metodi diversi, in funzione del tipo di regioni semiconduttrici che contengono, e i dispositivi risultanti vengono definiti P-MOS, N-MOS e C-MOS; questi ultimi combinano contemporaneamente le caratteristiche dei due precedenti.

Esiste una classificazione dei circuiti integrati in funzione dei compo-



nenti che contengono e quindi della densità di integrazione ottenuta.

In base a questa, si sono definite varie scale di integrazione che risultano essere:

*SSI*    *Small Scale Integration* (bassa scala di integrazione), che comprende integrati con una densità di alcune decine di componenti.

*MSI*    *Medium Scale Integration* (media scala di integrazione), che comprende integrati con una densità di alcune centinaia di componenti.

*LSI*    *Large Scale Integration* (alta scala di integrazione), che comprende integrati con una densità di alcune migliaia di componenti.

*VLSI*    *Very Large Scale Integration* (altissima scala di integrazione), che comprendono integrati con densità superiore a centomila componenti.





*IL TRANSISTORE COME AMPLIFICATORE***I**

l transistor è un componente che può svolgere un'ampia gamma di funzioni in un circuito elettronico. Occorre solo fornire le adeguate condizioni di lavoro, mediante determinate tensioni di alimentazione e un certo numero di componenti associati, per realizzare qualsiasi applicazione consentita da questo particolare elemento.

Una delle funzioni più importanti è quella amplificatrice, che sarà descritta in questo capitolo.

*Amplificazione*

La funzione di un amplificatore è quella di elevare il livello di un segnale elettrico che contiene una determinata informazione. Questo segnale, sotto forma di una tensione e di una corrente, viene applicato all'ingresso dell'elemento amplificatore che fornisce, in uscita, un altro segnale, contenente la stessa informazione, ma con un livello di tensione, di corrente o di entrambe più elevato, grazie ad una determinata quantità di energia prelevata da una sorgente di alimentazione.

Il transistor è capace di amplificare una corrente, di determinata intensità, applicata ad uno dei suoi terminali di ingresso (generalmente base o emettitore), rispondendo con una corrente maggiore sulla sua uscita (collettore).

Tuttavia, con questo tipo di funzionamento, si possono ottenere altre amplificazioni come quella di tensione e di potenza.

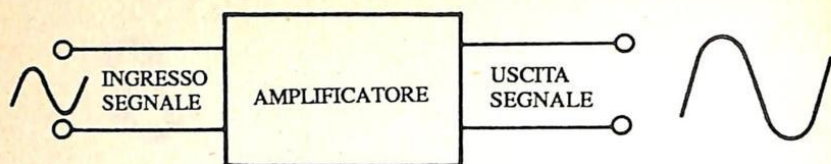


Fig. 1.-L'amplificazione consiste nell'elevare il livello o l'ampiezza di un determinato segnale.

### Amplificatore ad emettitore comune

Uno degli stadi amplificatori più utilizzati in pratica, è quello detto ad *emettitore comune*, rappresentato in figura 2, nel quale si può osservare che il terminale di emettitore si utilizza sia per l'ingresso che per l'uscita; il suo nome è dovuto a questa configurazione.

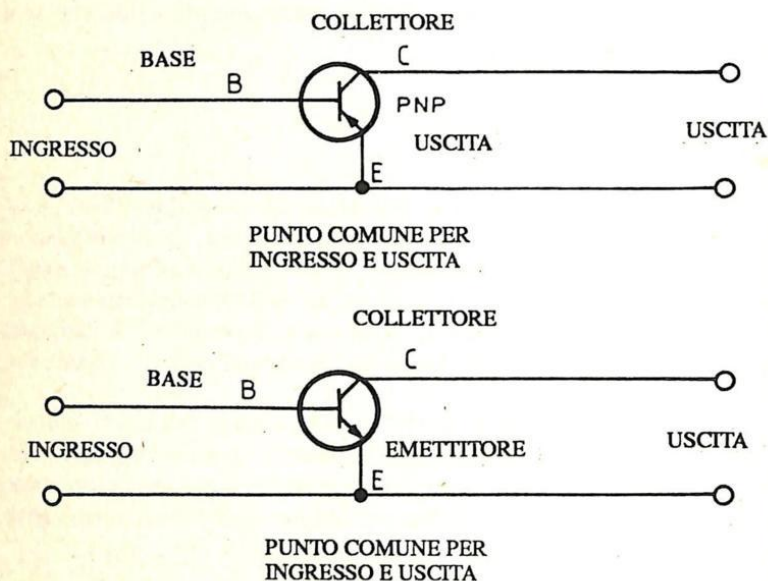


Fig. 2.-A) Transistore PNP in configurazione ad emettitore comune. B) Transistore NPN in configurazione ad emettitore comune.



L'ingresso del segnale avviene attraverso la *base*, e l'uscita si ottiene dal *collettore*.

Per studiare questo stadio, si considera inizialmente il suo comportamento quando gli si applicano tensioni continue.

Nella figura 3 è rappresentato un circuito in cui si collega una pila con una tensione  $V_b$  al circuito di *base*, ed un'altra  $V_c$  a quello di *collettore*, tramite delle resistenze  $R_b$  ed  $R_c$  rispettivamente. Trattandosi di un transistor NPN, la giunzione *base-emettitore* (P-N) è polarizzata direttamente, per cui nel circuito di *base* circolerà una corrente  $I_b$  dipendente dal valore della resistenza  $R_b$ .

La giunzione *base-collettore* (P-N) risulterà polarizzata inversamente, ma grazie all'*effetto transistor* si produrrà un'altra corrente  $I_c$  attraverso il secondo circuito, e comparirà una differenza di potenziale ai capi della resistenza  $R_c$ . Questa seconda corrente dipende totalmente dalla prima e risulta inoltre di valore molte volte superiore a questa.

Se allora si aumenta o diminuisce il valore di  $R_b$ , si otterranno aumenti e diminuzioni della corrente di *base*, e lo stesso succederà con quella di *collettore*, ma con una maggiore ampiezza, che produrrà delle variazioni della caduta di tensione sulla resistenza  $R_c$ .

## Guadagno

Si è prodotta pertanto una amplificazione di corrente.

Il valore di questa amplificazione è noto con il nome di *guadagno*, ed in questo caso è determinato dal fattore  $\beta$  (Beta), detto guadagno in continua del

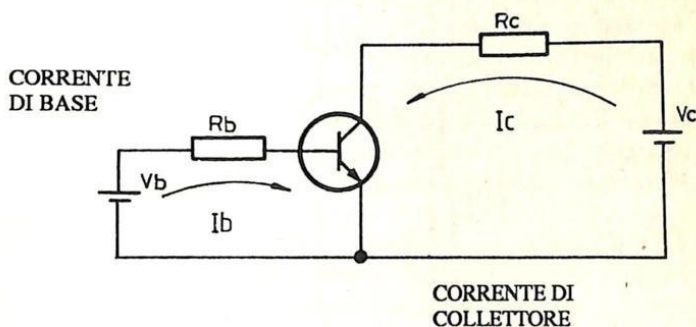


Fig. 3.-Amplificatore elementare ad un transistor.

transistore, che si può calcolare con l'equazione  $\beta = I_c/I_b$ .

Inoltre si otterrà una tensione, sulla resistenza  $R_c$ , dipendente anch'essa dalla corrente di ingresso  $I_b$  e quindi variabile.

Se, invece di variare la resistenza  $R_b$  si varia la tensione della pila, si produrrà un effetto analogo ottenendo, se il valore della resistenza  $R_c$  è quello adeguato, una amplificazione di tensione. Quindi su  $R_c$  sarà possibile raccogliere delle variazioni di tensione che potranno essere applicate allo stadio seguente.

La disposizione più comune di uno stadio amplificatore di questo tipo è rappresentata in figura 4.

In essa si osserva che sono scomparse le batterie, sostituite da una tensione  $+V$  ottenuta con qualsiasi procedimento. La base è collegata a due resistenze  $R_{b1}$  e  $R_{b2}$  che la polarizzano in continua, ed il collettore riceve la tensione continua tramite  $R_c$ .

In questa situazione, circolerà una determinata corrente di base ( $I_b$ ), ed un'altra di collettore ( $I_c$ ), per cui nel punto di collegamento tra  $R_c$  e il collettore, che costituisce l'uscita, esisterà una tensione  $V_c$ , minore di  $V$ .

Se allora si applica una tensione alternata  $V_{in}$ , alla base, con un livello basso, si otterrà all'uscita una tensione con la stessa forma d'onda di quella di ingresso, ma aumentata di livello.

Si è ottenuto un *guadagno di tensione* nel segnale, che si calcola mediante l'equazione  $G_v = V_c/V_{in}$ .

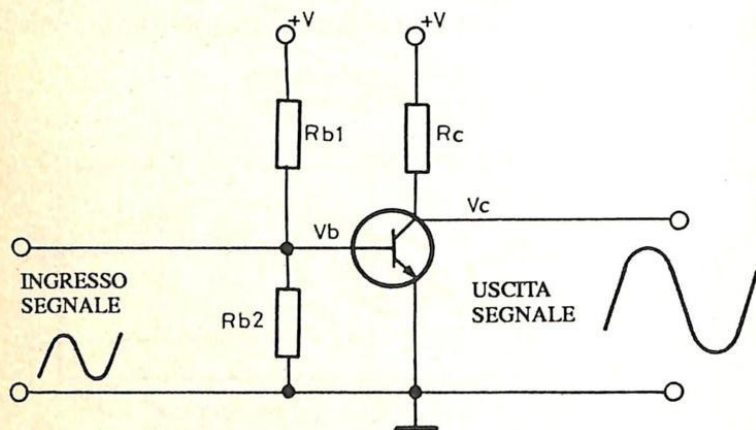


Fig. 4.-Disposizione usuale di uno stadio amplificatore con un transistore in configurazione ad emettitore comune.



## *Punto di lavoro*

Riassumendo, nel circuito precedente sono stati analizzati i due aspetti funzionali che intervengono in uno stadio amplificatore a transistor e che sono:

- Punto di lavoro.
- Guadagno di segnale.

Il primo è definito dalla situazione creata sul transistor dalle correnti continue che l'attraversano. Dipende pertanto dai valori di  $R_{b1}$ ,  $R_{b2}$  e  $R_c$ , in quanto, in funzione della corrente continua che entra in base, nel collettore circolerà una corrente maggiore o minore, sempre continua, causando su  $R_c$  delle differenze di potenziale diverse, dipendenti da questa, che determinano la tensione continua di uscita  $V_c$ .

Il secondo tiene conto solo del comportamento del circuito rispetto alle tensioni alternate (segnali), e esiste solo se il *punto di funzionamento* è stato scelto bene.

E' quindi della massima importanza definire un adeguato *punto di lavoro*, dato che da questo dipende tutto il funzionamento dello stadio amplificatore.

Il circuito a transistori che è stato presentato, si completa con una quarta resistenza  $R_e$  posta tra l'emettitore ed il punto comune, che produce un effetto di stabilizzazione, e facilita il progetto dello stadio (Fig. 5).

## *Effetto della temperatura*

Infine, è necessario conoscere un fenomeno che si presenta nei transistori, e che influenza il loro modo di operare, quando sono utilizzati per amplificare come precedentemente descritto. Tale fenomeno è la variazione della corrente con la temperatura. In effetti la corrente  $I_c$  non è del tutto costante per una  $I_b$  fissa, ma varia se le condizioni termiche circostanti si alterano. Questo effetto è più importante negli stadi che dissipano una certa potenza e si riscaldano durante il funzionamento. Poichè la corrente  $I_c$  aumenta quando sale la temperatura, la tensione continua  $V_c$  diminuisce, essendo maggiore la caduta su  $R_c$ .

Ciò fa spostare il *punto di lavoro*, giungendo a produrre tagli o distorsioni nel segnale. Per ovviare a questo fenomeno è molto efficace l'intervento dovuto all'ultima resistenza aggiunta al circuito ( $R_e$ ), poichè su di essa si otterrà una tensione maggiore se aumenta  $I_c$ ; in questo modo tale incremento si ripercuoterà sulla tensione emettitore-base esistente, facendo sì che la corrente di



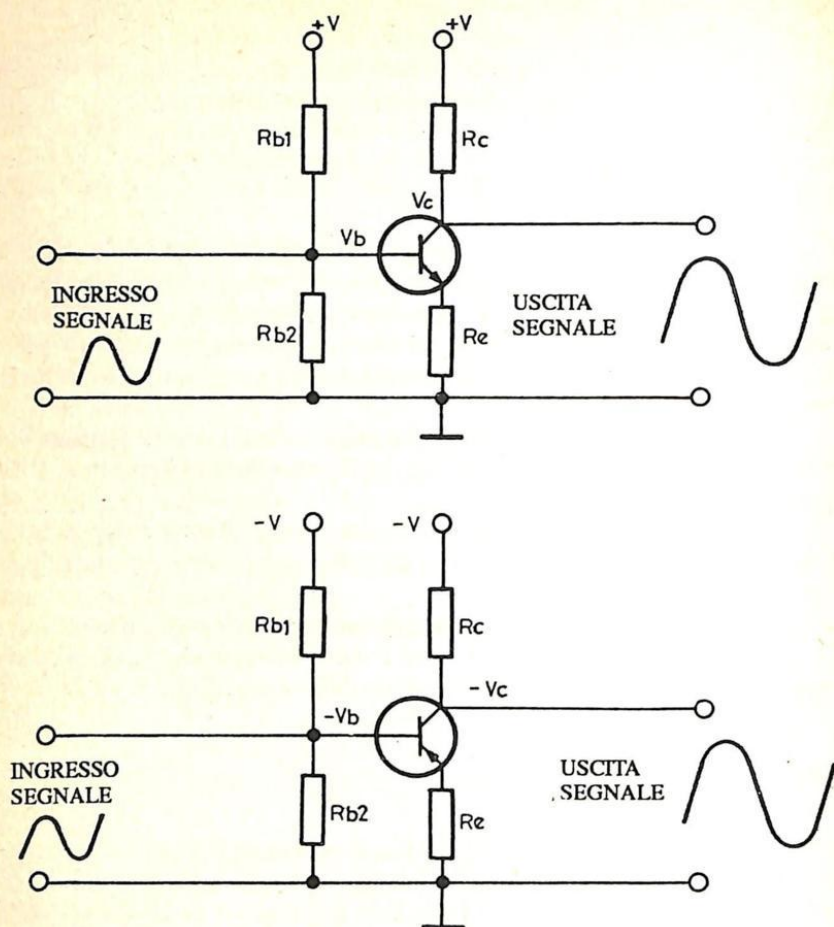


Fig. 5.-A) Questo stadio amplificatore dispone di una resistenza sull'emettitore per aumentare la sua stabilità termica. B) Si può realizzare uno stadio amplificatore simile con un transistor PNP. Le tensioni di polarizzazione saranno negative.

base diminuisca e, per suo tramite, anche quella di collettore, correggendo automaticamente il problema.

Tutto quanto detto è valido sia per transistori NPN che PNP, anche se per quest'ultimo sarà necessario utilizzare tensioni di alimentazione di segno op-

posto a quelle descritte.

Quando un transistor si utilizza in configurazione ad emettitore comune, il guadagno di tensione del circuito dipende dal valore dell'amplificazione di corrente del transistor utilizzato. Data la grande dispersione di valori per tale parametro, fondamentalmente a causa del processo di fabbricazione, può essere difficile stabilire a priori quale sarà il guadagno di un circuito.

A tale fatto si può ovviare utilizzando certe tecniche come, ad esempio, quella di *reazione negativa* o *controreazione*. Fondamentalmente questa tecnica consiste nel reintrodurre all'ingresso parte del segnale di uscita (reazione) con segno opposto (negativa).

Benchè con questa tecnica si perda parte del guadagno che il circuito sarebbe in grado di fornire, si ottengono in cambio degli utili vantaggi, come una più ampia risposta in frequenza, una minore distorsione e, in particolare, un guadagno complessivo indipendente dal guadagno in corrente del transistor impiegato, per cui si possono progettare circuiti con un guadagno fisso stabilito di, ad esempio, 50 volte, anche se il transistor impiegato ha una dispersione, nel valore del fattore proprio di amplificazione, tanto ampia da variare nel campo da 100 a 500.

### *Amplificatori a base comune*

Dopo aver visto lo stadio ad emettitore comune, è conveniente analizzare le altre due possibilità di montaggio del transistor, cioè le configurazioni dette: a base comune e a collettore comune.

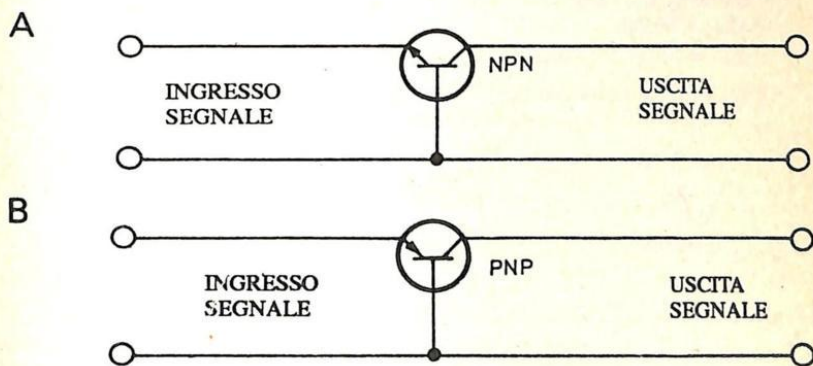


Fig. 6.-Disposizione di principio di un transistor a base comune. A) Con transistor NPN. B) Con transistor PNP.



La prima, come dice il suo nome, ha come terminale comune, per l'ingresso e l'uscita, la base. L'ingresso è costituito dall'emettitore e l'uscita dal collettore.

In questo sistema si deduce rapidamente che il guadagno di corrente sarà molto basso, poichè la corrente di emettitore è costituita da due elementi: la corrente di base e quella di collettore. Quest'ultima, pertanto, sarà inferiore a quella di ingresso, facendo sì che il guadagno sia inferiore all'unità. Questo fattore si indica con la lettera  $\alpha$  (alfa) e si calcola come  $\alpha = I_c/I_e$ .

### Guadagno di tensione

Il guadagno di tensione che si può ottenere con questa configurazione è, tuttavia, abbastanza elevato. Ciò si deve al fatto che la resistenza o impedenza di ingresso attraverso l'emettitore è bassa, mentre quella di uscita è molto alta.

Di conseguenza, applicando un debole livello di segnale all'ingresso, si produrranno delle piccole variazioni della corrente di emettitore, le quali giungeranno al collettore e saranno applicate alla resistenza di carico, normalmente di valore elevato.

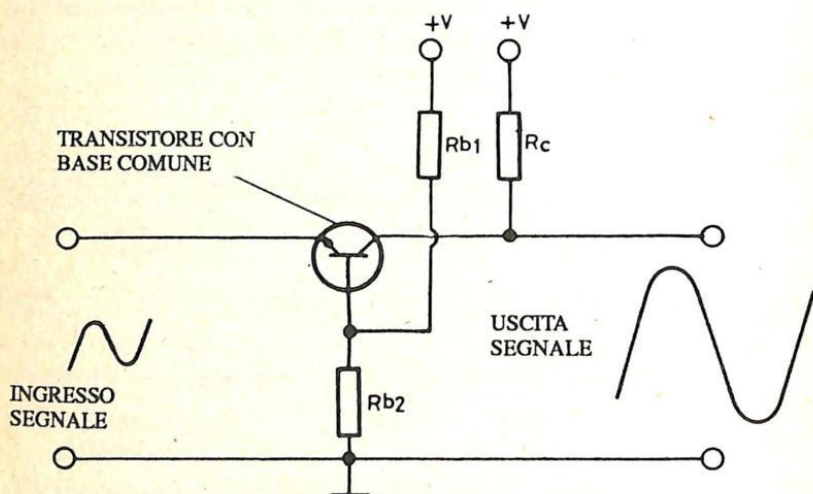


Fig. 7.-Stadio configurato a base comune con transistor NPN, polarizzato con resistenze sulla base.

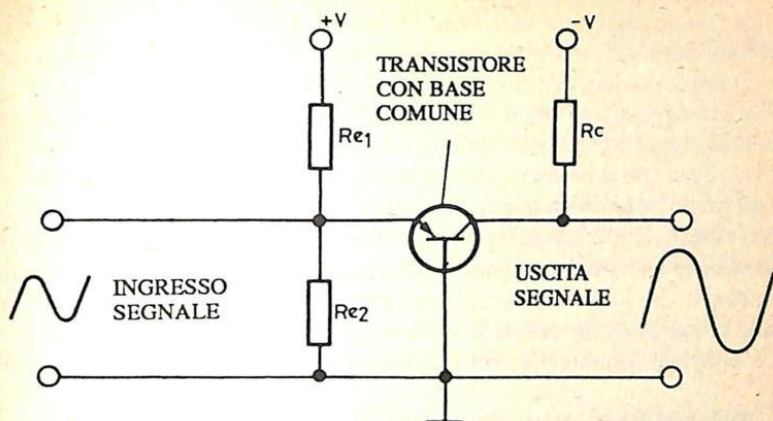


Fig. 8.-Stadio configurato a base comune con transistor PNP, con il punto di lavoro determinato dall'emettitore.

A prima vista si deduce che le stesse variazioni di corrente applicate su due valori di resistenza molto diversi, produrranno, in base alla legge di Ohm, due livelli di tensione con diverso ordine di grandezza, e quindi un'amplificazione.

Il livello di segnale che si ottiene su  $R_c$  all'uscita sarà  $V_{us} = I_c \times R_c$ ; d'altra parte  $I_c = (V_{in}/R_{in}) \times \alpha$ , per cui  $V_{us} = V_{in} \times R_c \times \alpha/R_{in}$ .

In definitiva si ottiene un guadagno di tensione  $G_V = V_{us}/V_{in} = R_c \times \alpha/R_{in}$ , definito dal rapporto tra la resistenza di collettore e quella di ingresso del transistor.

Prendendo come esempio un transistor che presenti una resistenza d'ingresso dell'ordine di  $100 \Omega$ , con una resistenza  $R_c$  da  $10 \text{ k}\Omega$  nel circuito di collettore, e con un fattore  $\alpha=0,9$  si otterrà un guadagno

$$G_V = 10.000 \cdot 0,9/100 = 90$$

il che presuppone che se si applica un segnale di ingresso di  $0,01 \text{ V}$  si otterranno  $0,9 \text{ V}$  all'uscita.

Lo schema elettrico di questo stadio è quello rappresentato nelle figure 7 e 8. In esso si osservano le resistenze che polarizzano la base e il collettore, collocando il transistor nel *punto di lavoro* più adeguato.

Nella figura 7 è rappresentato uno stadio realizzato con un transistor NPN, mentre nella successiva uno del tipo PNP, con il segno delle tensioni ap-



plicate logicamente invertito.

La configurazione a collettore comune, detta anche ad *inseguitore di emettitore*, ha l'ingresso del segnale sulla base e l'uscita sull'emettitore, mentre il terminale comune per ingresso e uscita è quello di collettore.

In questo caso non esisterà guadagno di tensione poichè, come si può dedurre dalle figure 9 e 10 nelle quali è rappresentato lo schema di questo stadio, la tensione che apparirà tra l'emettitore e la massa, applicata alla resistenza  $R_e$ , sarà un po' inferiore a quella di ingresso a causa della piccola attenuazione che presenta la giunzione base-emettitore. Tuttavia questo stadio è caratterizzato da una resistenza o impedenza di ingresso elevata, e da quella di uscita molto bassa. Ciò implica un considerevole guadagno di corrente, dato che il segnale di ingresso, che possiede un determinato livello di tensione, impiega solo una debole corrente per eccitare lo stadio, a causa della sua alta resistenza.

All'uscita la situazione sarà diversa perchè il transistor fornisce la corrente necessaria alla resistenza di emettitore, in modo che su essa compaia praticamente la stessa tensione che esiste all'ingresso, il che implica una corrente abbastanza elevata, essendo questa resistenza di valore relativamente basso.

### Caso pratico

Per chiarire al massimo questi concetti, si prenda come esempio uno sta-

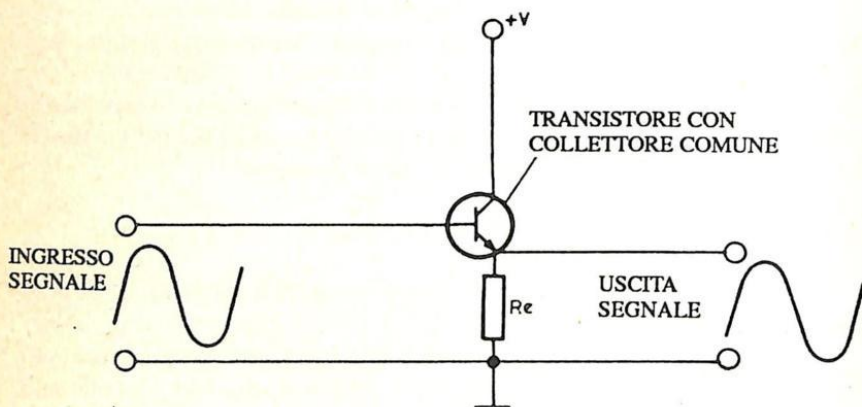


Fig. 9.-Schema di uno stadio amplificatore a transistor configurato con collettore comune.

dio a *collettore comune*, con un'impedenza d'ingresso di  $50\text{ k}\Omega$  e una resistenza sull'uscita ( $R_e$ ) di  $500\ \Omega$ .

Applicando un segnale di ingresso con un livello di  $1\text{ V}$ , circolerà una corrente di ingresso di  $1/50.000 = 0,02\text{ mA}$ .

Questo stesso segnale leggermente attenuato che compare sulla resistenza di emettitore, si supponga sia di  $0,9\text{ V}$ , per cui la corrente risulterà di  $0,9/500 = 1,8\text{ mA}$ .

Il guadagno in corrente è quindi di  $I_{us}/I_{in} = 1,8/0,02 = 90$ . Questo valore si può ottenere direttamente dividendo la resistenza di ingresso per quella di uscita, e moltiplicando il risultato per  $0,9$ , che è il fattore di attenuazione supposto.  $G_i = I_{us}/I_{in} = R_{in}/R_{us}$ .

In tale schema (Figg. 10 e 11) si può osservare che la base si polarizza utilizzando due resistenze, allo stesso modo che nello stadio ad emettitore comune.

Si deve anche considerare che queste resistenze che definiscono il *punto di lavoro*, assieme a quella di emettitore, influiscono sulla resistenza d'ingresso dello stadio completo, per cui devono essere scelte di valore sufficientemente alto. D'altra parte il transistor avrà una buona stabilità termica, grazie alla resistenza  $R_e$  di emettitore, che all'aumentare della corrente di collettore, in caso di aumento della temperatura, causerà una maggior caduta, diminuendo la tensione base-emettitore e compensando l'inconveniente.

Questo stadio si utilizza normalmente come adattatore di impedenza tra due parti di un circuito.

| <i>Configurazione</i>              | <i>Emettitore comune</i> | <i>Collettore comune</i> | <i>Base comune</i> |
|------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------|
| Impedenza di ingresso              | Media                    | Alta                     | Bassa              |
| Impedenza di uscita                | Media                    | Bassa                    | Alta               |
| Guadagno in tensione               | Medio                    | Unitario                 | Alto               |
| Guadagno in corrente               | Medio                    | Alto                     | Unitario           |
| Inversione di fase ingresso-uscita | Si                       | No                       | No                 |

### *Configurazione Darlington*

Esiste una combinazione di transistori, secondo lo schema di figura 12, detto *Darlington*, che accentua le proprietà di alta impedenza di ingresso, bassa impedenza di uscita, ed elevato guadagno di corrente, poichè il secondo



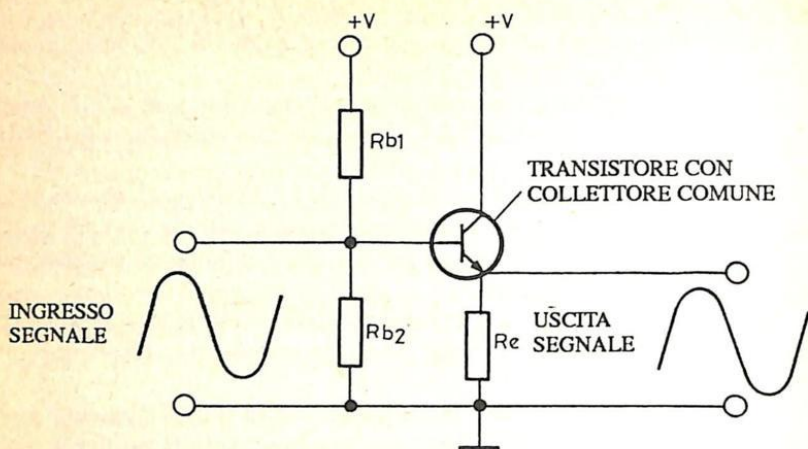


Fig. 10.-Stadio completo a collettore comune con le resistenze necessarie per polarizzare il transistor e posizionarlo nel punto di lavoro adeguato.

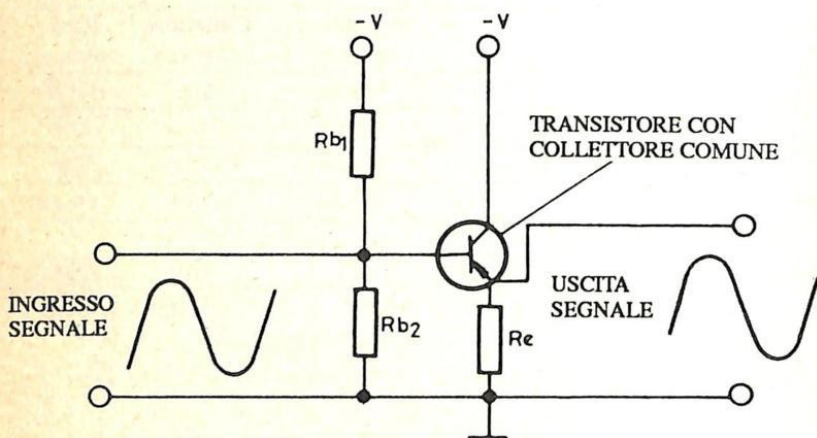


Fig. 11.-Stadio simile al precedente realizzato con transistor PNP.

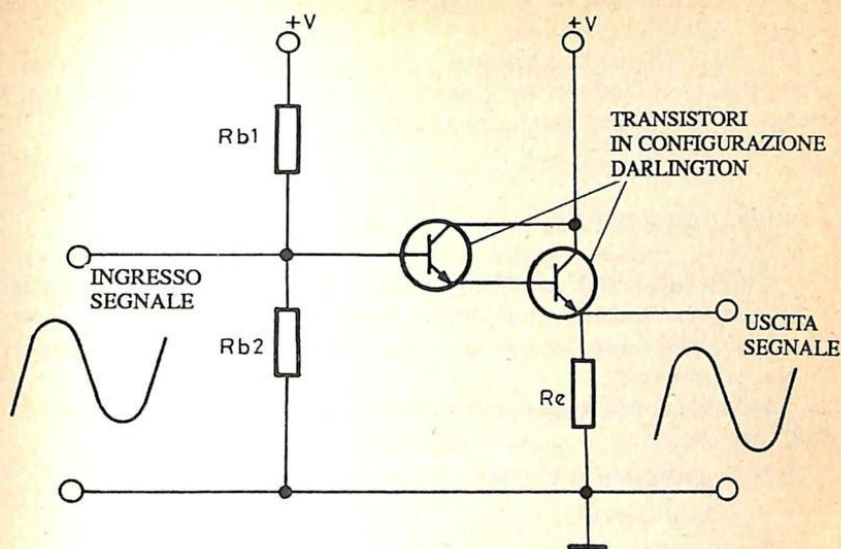


Fig. 12.-Schema di montaggio di due transistori con collettore comune in configurazione Darlington.

transistore moltiplica il guadagno totale ricevendo sulla sua base la corrente di emettitore del primo.

Esistono sul mercato transistori già montati in configurazione *Darlington*, incapsulati in un contenitore comune, da cui fuoriescono solo tre terminali, come se si trattasse di un unico transistor.

### Circuiti di alimentazione

Come si sarà potuto osservare, di solito, non si rappresentano le batterie o circuiti di alimentazione che forniscono le tensioni necessarie al funzionamento.

Questa è una pratica abbastanza abituale nel disegno degli schemi di circuiti elettronici.

E' anche necessario sapere che le alimentazioni si comportano come se si trattasse di cortocircuiti rispetto ai *segnali* che vengono amplificati. Ciò si deve ai condensatori di filtro, e implica che il positivo e la massa costituiscano lo stesso punto elettrico per questi *segnali*, pertanto sarà equivalente, agli



effetti della circolazione del *segnale*, qualsiasi resistenza o altro componente collegato al positivo e a massa.

Di fatto nello stadio a collettore comune, questo non è collegato a massa come nei precedenti casi, ma il suo collegamento è effettuato al positivo, o al negativo se si tratta di un transistor PNP.

### *Amplificatori a più stadi*

Conosciuti gli stadi amplificatori a transistori fondamentali, occorre descrivere i diversi metodi di collegamento tra vari stadi, allo scopo di completare la descrizione. Il collegamento elettrico tra due o più stadi amplificatori si dice *accoppiamento*.

In base al tipo di *accoppiamento*, si possono classificare gli amplificatori in varie classi:

- Amplificatori in corrente continua.
- Amplificatori RC.
- Amplificatori sintonizzati.

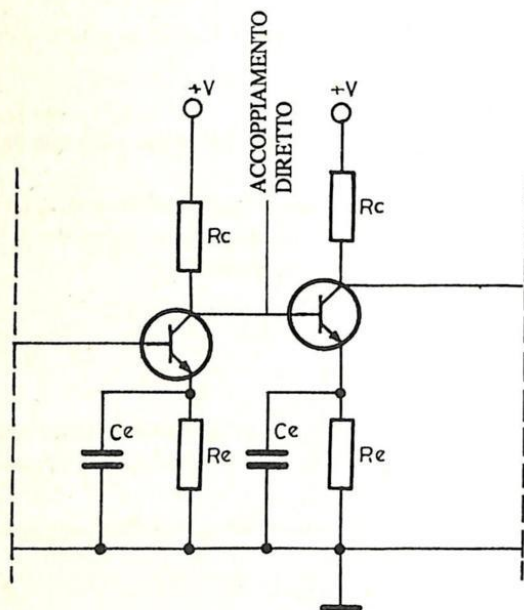


Fig. 13.-Due stadi amplificatori accoppiati direttamente, come parte di un amplificatore in corrente continua.

## *Amplificatori in corrente continua*

Gli amplificatori in corrente continua hanno i diversi stadi collegati direttamente, senza necessità di condensatori.

Presentano una gran difficoltà di progetto, poichè sono correlati i *punti di lavoro* di ciascun transistor, in modo che nella *polarizzazione* di ciascuno intervengono il precedente e il seguente.

Hanno l'inconveniente addizionale di essere sensibili alle derive termiche, o di qualsiasi altro tipo, che vengono anch'esse amplificate; pertanto esigono studi molto rigorosi per la loro realizzazione. Il loro grande vantaggio è che sono in grado di lavorare dalla frequenza zero (corrente continua), il che li rende utilizzabili in quelle applicazioni in cui le variazioni di segnale sono molto lente.

Si usano anche per l'amplificazione dei segnali video, cercando in questo caso di ampliare la frequenza di taglio al massimo possibile, in accordo con l'ampiezza di banda di questi segnali che può arrivare a raggiungere gli 8 o 10 MHz.

## *Amplificatori RC*

Negli amplificatori RC l'*accoppiamento* tra stadi si realizza tramite un condensatore, che separa i livelli della tensione continua di ciascuno di essi.

L'uscita di ogni stadio si preleverà quindi sulla resistenza di carico di collettore o emettitore, e verrà collegata al condensatore che la porta allo stadio successivo. Questo condensatore viene scelto in modo che presenti una bassa *reattanza* per i segnali che lo attraverseranno, perchè se così non fosse, si produrrebbe un'attenuazione degli stessi.

Questo sistema è quello maggiormente usato negli amplificatori ad audiofrequenza.

Gli amplificatori sintonizzati realizzano l'*accoppiamento* tra stadi tramite un circuito *risonante*. Pertanto il loro guadagno sarà elevato per una certa frequenza o campo di frequenze, diminuendo sensibilmente al di fuori di questa banda.

Per l'accoppiamento si utilizza un sistema bobina-condensatore, o un trasformatore, con o senza nucleo magnetico, che separa i livelli di continua, ottenendo la sintonia con un condensatore accoppiato al primario, al secondario o ad entrambi.

Questo tipo di *accoppiamento* si usa negli amplificatori ad alta frequenza, e lo si incontra nella maggioranza degli stadi a radiofrequenza e media frequenza dei ricevitori radio e TV.



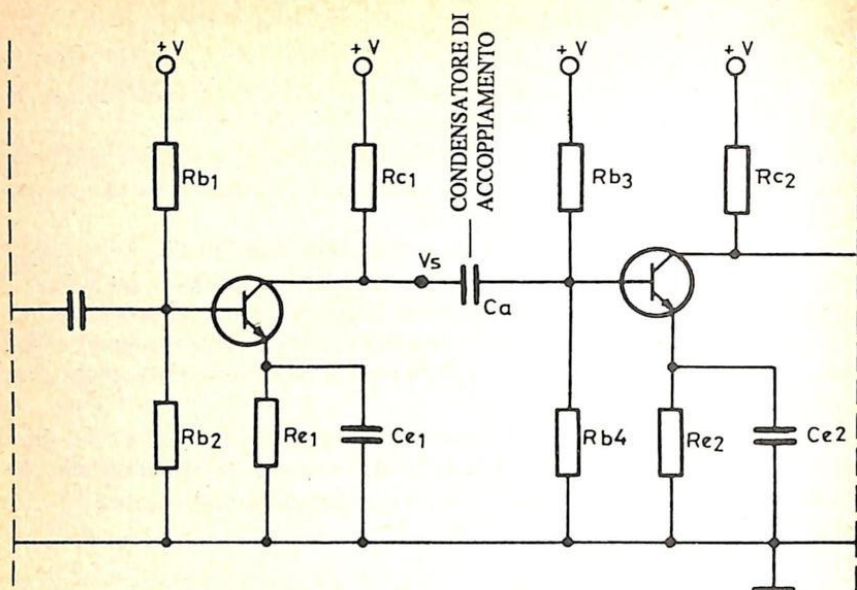


Fig. 14.-Accoppiamento RC. Sono rappresentati due amplificatori uguali accoppiati tramite un condensatore.

## Classi di amplificazione

Anche in base alla forma con cui si amplifica il segnale, esiste una classificazione che occorre conoscere.

Nell'amplificazione detta in *classe A*, la corrente di uscita dell'amplificatore segue costantemente la forma del segnale, senza annullarsi in alcun momento, con un guadagno costante in ciascun istante del ciclo del segnale. E' il caso più conosciuto di amplificazione.

L'amplificazione in *classe AB* presenta il taglio di una frazione di segnale, inferiore a mezzo ciclo, causato dall'annullamento della corrente nell'amplificatore, durante il tempo in cui è applicata questa parte di segnale.

Si usa in alcuni amplificatori di potenza di segnali audio.

Negli amplificatori in *classe B* la corrente si annulla durante metà ciclo, o semiperiodo, del segnale. La sua applicazione è molto estesa negli amplificatori di potenza audio, per gli stadi di uscita, quando si utilizzano transistori in *controfase* (push-pull o transistori complementari).

Gli amplificatori in *classe C* presentano la particolarità che la corrente circola durante un tempo inferiore a metà ciclo del segnale. Come si può com-

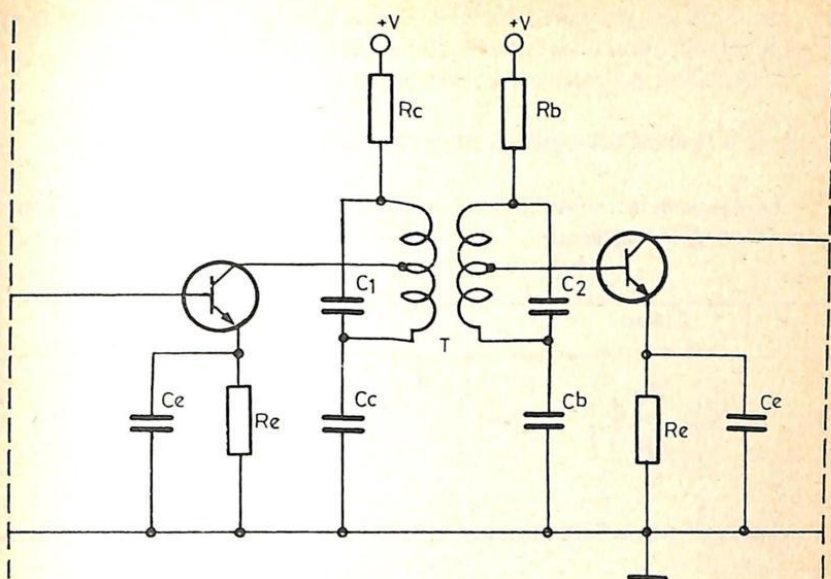


Fig. 15.-Accoppiamento tra due stadi mediante trasformatore con primario e secondario sintonizzati.

prendere la *distorsione* è molto alta, ma si corregge con *accoppiamenti* sintonizzati e circuiti di filtro.

Si usa negli amplificatori di elevata potenza dei trasmettitori radio, ma non si può utilizzare per la televisione.

Di tutti i metodi di amplificazione elencati, l'unico che non produce *distorsione* sul segnale è il primo o in *classe A*; tuttavia è quello che possiede minor *rendimento* di conversione di potenza.

Gli altri sistemi hanno un miglior *rendimento*, ma introducono pesanti *distorsioni*, che si possono annullare impiegando circuiti adatti a tale scopo come quelli di *controreazione*.

## Rendimento

Il *rendimento* di un amplificatore è un fattore applicabile quasi esclusivamente agli stadi di potenza.

Questo fattore indica la percentuale della potenza, fornita tramite il cir-



cuito di alimentazione, che si trasforma in potenza di segnale; il resto si dissipa, sotto forma di calore, nell'ambiente esterno, attraverso i contenitori degli elementi amplificatori e le resistenze di polarizzazione.

L'equazione per calcolare il rendimento è:

$\text{Rend.} = \text{Potenza del segnale} / \text{Potenza totale fornita dall'alimentazione.}$

I *rendimenti* massimi che si possono ottenere con i diversi metodi di amplificazione sono i seguenti:

| Classe | Rendimento       |
|--------|------------------|
| A      | 25%              |
| B      | 50%              |
| AB     | 25-50%           |
| C      | Superiore al 50% |

### *Circuito reale*

Per arrivare a comprendere perfettamente il funzionamento di un amplificatore a vari stadi, si prenda come esempio il circuito rappresentato in figura 14 che, come si può osservare, è costituito da due stadi a transistori, in configurazione ad emettitore comune, con *accoppiamento RC*; questa applicazione si può estendere ad altri amplificatori a più stadi senza ulteriori problemi.

Le condizioni di *polarizzazione* e di posizionamento del *punto di lavoro* si ottengono in modo simile in entrambi i transistori.

Le resistenze  $R_{b1}$ ,  $R_{b2}$ ,  $R_{b3}$ ,  $R_{b4}$ ,  $R_{e1}$  e  $R_{e2}$  servono per ottenere dette polarizzazioni, fornendo inoltre la stabilità termica necessaria.

Le resistenze  $R_{c1}$  e  $R_{c2}$  sono quelle di *carico*, sulle quali si ottengono gli effetti della variazione di corrente del collettore, prodotta dalle variazioni della corrente di base. Le tensioni di alimentazione sono fornite da una sorgente esterna, rappresentata con +V, con il negativo a *massa*.

Si può notare un condensatore  $C_e$  connesso agli emettitori, in parallelo con  $R_e$ , che serve per collegare gli stessi a massa, unicamente rispetto ai segnali alternati, che sono quelli che devono essere amplificati.

Se non ci fosse questo condensatore, si produrrebbe su  $R_e$  una caduta di

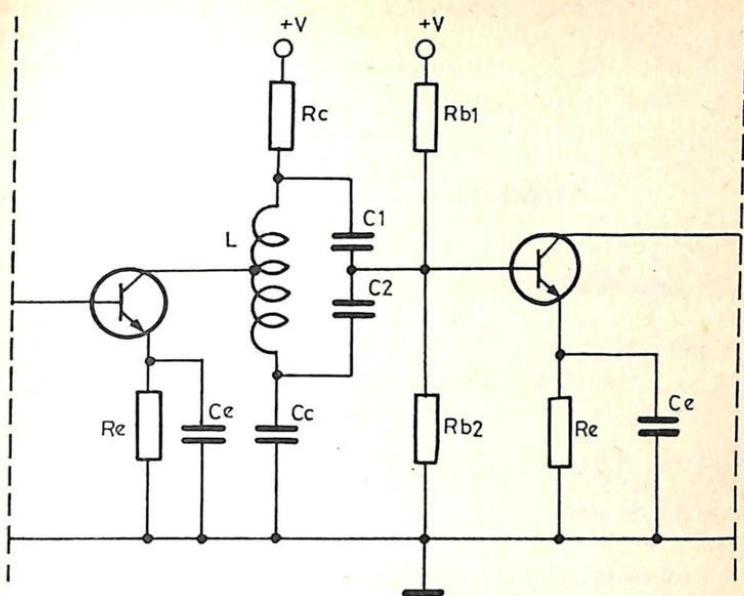


Fig. 16.-Accoppiamento tra stadi tramite circuito risonante formato da  $L$ ,  $C1$  e  $C2$ .

segnale utile, che provocherebbe una diminuzione del guadagno, e che si sottrarrebbe a quella ottenuta su  $R_c$ .

Attraverso il condensatore  $C_a$  si realizza l'accoppiamento tra i due stadi.

Il guadagno totale di corrente è il prodotto dei guadagni di ciascun singolo stadio.

### Resistenza di carico

Per determinare la resistenza di carico reale di ogni stadio, fattore che influisce direttamente sul guadagno di tensione, è necessario conoscere, oltre alla resistenza  $R_c$  posta sul collettore, la resistenza di ingresso dello stadio, poichè questa si comporta come carico dello stadio precedente.

In effetti, quando il circuito è attraversato da un segnale, la resistenza  $R_{c1}$  è posta in parallelo con la resistenza di ingresso dello stadio successivo, attraverso il condensatore  $C_a$  che si comporta come se fosse un cortocircuito



per il segnale, e attraverso i condensatori di filtro della sorgente di alimentazione posti tra +V e la massa.

Quindi la resistenza di carico effettiva è la combinazione di entrambe, e si ottiene per mezzo dell'equazione delle resistenze in parallelo:

$$R_{\text{parallelo}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

che applicata a questo caso fornisce:

$$R_{\text{carico}} = \frac{R_{c1} \cdot R_{in}}{R_{c1} + R_{in}}$$

### *Impedenza di ingresso*

La resistenza o impedenza di ingresso di ogni stadio è condizionata dalle due resistenze  $R_{b1}$ ,  $R_{b2}$  o  $R_{b3}$ ,  $R_{b4}$  che polarizzano la base e, tramite l'alimentazione, si trovano in parallelo rispetto al segnale, ed entrambe, a loro volta, in parallelo con quella del transistor, ottenuta dalle curve caratteristiche di ingresso.

Pertanto, per calcolarla, occorre applicare due volte l'equazione precedente:

$$R_b = \frac{R_{b1} \cdot R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2}}$$

$$R_{in} = \frac{R_b \cdot R_{tr}}{R_b + R_{tr}}$$

### *Guadagno di tensione*

Noto il valore di tutte le resistenze che influiscono sul funzionamento, si può ottenere il guadagno in tensione di ogni stadio, moltiplicando la corrente del segnale che entra, attraverso la base, per il guadagno di corrente ( $\beta$ ), e ottenendo così la corrente di collettore che, moltiplicata a sua volta per la resi-

**Tabella di conversione dai guadagni di tensione ( $V_{us}/V_{in}$ ) e di potenza ( $P_{us}/P_{in}$ ) a decibel (dB)**



stenza di carico, calcolata come detto precedentemente, dà come risultato la tensione del segnale ( $V_{us}$ ) all'uscita del primo stadio. La corrente di base del secondo stadio si otterrà dividendo la tensione precedente ( $V_{us}$ ) per la resistenza di ingresso.

Se si ripete tutto il calcolo, partendo da questa corrente, si otterrà la tensione finale di uscita.

Negli amplificatori in corrente continua, è la resistenza di collettore ( $R_c$ ) quella che si utilizza per polarizzare lo stadio successivo.

Per gli amplificatori sintonizzati, è valido tutto quanto detto, applicato solo alla banda di frequenze per cui è stato progettato.

## *Il decibel*

Il *decibel* è un'unità di misura ottenuta dalla comparazione di due livelli di segnale in un circuito elettronico, benchè possa essere generalizzato per altre applicazioni, come ad esempio quelle acustiche.

Prendendo come riferimento uno stadio qualsiasi di un amplificatore, in cui si ottenga un certo innalzamento del livello del segnale, si può definire il termine detto *guadagno* come risultato della divisione del livello del segnale ottenuto in uscita per quello applicato all'ingresso, cioè:

$$G = \frac{V_{us}}{V_{in}}$$

( $V_{us}$  = tensione di uscita e  $V_{in}$  = tensione di ingresso).

Da questa equazione si ottiene un certo numero che, nel caso di grandi amplificazioni, assume un valore abbastanza elevato. Nella pratica si suole esprimere questo valore utilizzando le unità dette *decibel*, che si calcolano in base all'equazione:

$$\text{Guadagno (dB)} = 20 \log G;$$

pertanto risulterà:

$$\text{Guadagno (dB)} = 20 \log \frac{V_{us}}{V_{in}}$$

## Guadagno di potenza

Se per il calcolo si usano livelli di potenza invece di livelli di tensione, si otterrà il *guadagno di potenza* e, pertanto, si dovrà tener conto anche delle correnti che circolano, o delle resistenze o impedenze di carico.

In questo caso la potenza di uscita ( $P_{us}$ ) sarà:  $P_{us} = V_{us}^2 / Z$ , da cui  $V_{us} = \sqrt{P_{us} \times Z}$ . Queste equazioni valgono anche per la potenza di ingresso, quindi:

$$\begin{aligned} \text{Guadagno (dB)} &= 20 \log \frac{V_{us}}{V_{in}} = 20 \log \frac{\sqrt{P_{us} \cdot Z}}{\sqrt{P_{in} \cdot Z}} = \\ &= 10 \log \frac{P_{us} \cdot Z}{P_{in} \cdot Z} = 10 \log \frac{P_{us}}{P_{in}} \end{aligned}$$

supponendo naturalmente che l'impedenza ( $Z$ ) di uscita sia uguale a quella di ingresso.

Entrambe le equazioni, quella del guadagno di tensione e quella del guadagno di potenza, sono le più frequentemente impiegate, e con esse si facilitano i calcoli.

Data l'ampia utilizzazione dei *decibel*, è conveniente familiarizzare con essi allo scopo di poter interpretare qualsiasi misura senza la necessità di dover ricorrere a calcoli rigorosi con i logaritmi.

Uno dei maggiori vantaggi forniti da questo sistema, è quello di poter calcolare rapidamente il guadagno o l'attenuazione di una apparecchiatura con vari stadi, conoscendo i dati di ognuno di essi. Basterà semplicemente sommare i *decibel* di ciascuno stadio, per ottenere il totale.

Nei casi in cui il risultato in *decibel* sia negativo, vorrà dire che esiste un'attenuazione, per cui la potenza o tensione di uscita sarà inferiore a quella di ingresso.

## Livelli di riferimento

Dato che il *decibel* è un'unità di misura relativa, è stato necessario, per alcune applicazioni, fissare dei livelli di riferimento, allo scopo di realizzare la misura rispetto ad essi e ottenere così un risultato assoluto. Per esempio nei sistemi audio, in cui si utilizza un'impedenza unificata di 600  $\Omega$ , si usa il *dBV* e il *dBm*.



La misura in *dBV* si realizza prendendo come riferimento quella di 0 *dBV*, che corrisponde ad un segnale di 1 V di picco o 0,707 V di tensione efficace.

Il riferimento per la misura in *dBm* è 1 mW (milliwatt). Nei calcoli per l'installazione di antenne individuali o centralizzate, nelle quali esistono amplificatori e elementi che introducono perdite, si utilizza questo sistema di misure, benchè per il livello preso come riferimento si usi lo 0 *dBμV*=1μV (microvolt) su 60 Ω di impedenza. Su tutti i livelli di riferimento suddetti, si può eseguire qualsiasi operazione di somma o sottrazione di *decibel* relativi, per il calcolo del livello di uscita del sistema che si studia.

## La controeazione

Un circuito elettronico si dice controeazionato o reazionato quando il segnale applicato al suo ingresso è formato da due elementi: uno di essi è il segnale proveniente dall'esterno, l'altro una frazione del segnale che detto circuito fornisce all'uscita. Questo procedimento è molto impiegato nel progetto di circuiti che realizzano svariate funzioni: tra questi si distinguono gli amplificatori e gli oscillatori.

In funzione delle caratteristiche del segnale che dall'uscita torna all'ingresso, si possono considerare due diversi tipi di controeazione, che sono:

- Controeazione positiva: in questo caso i due segnali che confluiscono all'ingresso tendono a sommarsi in fase, il che implica un rafforzamento del segnale totale elaborato dal circuito.

- Controeazione negativa: quando il segnale che torna dall'uscita è in

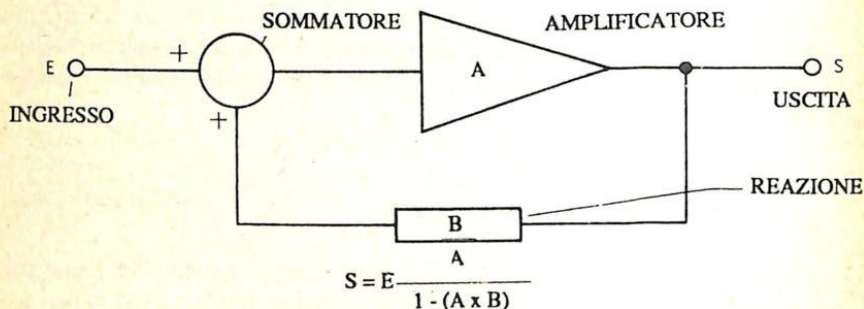


Fig. 17.-Schema di principio di un amplificatore controeazionato ed equazione per calcolare il segnale di uscita.

opposizione di fase con quello d'ingresso, il segnale ottenuto sarà compreso tra i due, con diminuzione del livello totale di uscita.

Considerando un amplificatore con un guadagno  $A$ , cui si aggiunga una rete di controreazione che fa tornare all'ingresso una frazione  $B$  del segnale di uscita, si otterrà un nuovo guadagno complessivo definito dalla equazione:

$$G = \frac{A}{1 - (A \cdot B)}$$

Nel caso in cui il prodotto  $A \cdot B$  sia positivo ed il guadagno minore di 2, si otterrà una controreazione positiva ed il guadagno totale  $G$  aumenterà. Si osservi che il circuito potrebbe diventare instabile nel caso che  $A \cdot B$  si avvicini ad 1, poichè il denominatore  $1 - (A \cdot B)$  tenderebbe ad annullarsi, per cui il guadagno aumenterebbe enormemente. Questo è il principio di funzionamento degli oscillatori.

Se, al contrario, il prodotto  $A \cdot B$  diventa superiore a 2, il risultato della equazione precedente sarà inferiore al guadagno iniziale  $A$  e, pertanto, la controreazione sarà negativa.

Il risultato ottenuto dalla moltiplicazione del guadagno  $A$  per la frazione del segnale di uscita  $B$ , è detto *fattore di controreazione*, mentre il risultato dell'operazione  $1 - (A \cdot B)$  si chiama *differenza di ritorno*.

In certi circuiti, che lavorano con un'ampia gamma di frequenze, può accadere che, anche impiegando una rete fissa di controreazione, si ottengano i due comportamenti menzionati, poichè, generalmente, le fasi dei segnali di ingresso e uscita dipendono dalla risposta in frequenza del circuito, per cui in alcuni casi questo può fornire un comportamento instabile.

### *Effetti della controreazione negativa*

| <i>Caratteristiche che variano</i> | <i>Controreazione in tensione</i> | <i>Controreazione in corrente</i> |
|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Distorsione                        | Si riduce                         | Si riduce                         |
| Rapporto segnale/rumore            | Migliora                          | Migliora                          |
| Impedenza di ingresso              | Aumenta                           | Diminuisce                        |
| Impedenza di uscita                | Diminuisce                        | Aumenta                           |



## *Effetti prodotti*

Gli effetti prodotti da una rete di controreazione negativa sono svariati, poichè si ottiene un certo miglioramento delle principali caratteristiche del sistema, ad eccezione del guadagno.

In primo luogo si ottiene un sensibile miglioramento della distorsione, poichè le armoniche indesiderate diminuiscono, essendo il loro livello ridotto di un fattore  $1 - (A \cdot B)$ .

Si ottiene anche un miglioramento del rapporto segnale/rumore, però solo nel caso il rumore si generi nello stadio controreazionato, mentre non si esercita alcun effetto su quello proveniente dall'ingresso assieme al segnale utile.

Esiste, infine, un altro effetto da considerare, relativo alle impedenze di ingresso e di uscita del circuito. Una controreazione negativa di tensione origina un aumento dell'impedenza di ingresso e una riduzione di quella di uscita; tuttavia, se invece di una tensione si controreaziona una corrente, l'effetto sarà opposto, poichè l'impedenza di ingresso diminuirà e quella di uscita aumenterà.

## OSCILLATORI A TRANSISTORI



Un altro circuito che ha grande importanza per la sua ampia utilizzazione pratica è l'oscillatore.

La sua funzione originaria è di generare oscillazioni elettriche permanenti, cioè un segnale sinusoidale continuo e con valori di ampiezza e frequenza determinati.

Il transistor, lavorando come amplificatore, è un elemento imprescindibile per la realizzazione di oscillatori, poichè permette di prendere dall'alimentazione l'energia necessaria da fornire al circuito oscillante primario, formato da uno stadio L-C (induttanza e condensatore), in modo che l'insieme generi un segnale automantenuto.

*Cristallo di quarzo*

Gli elementi essenziali, capaci di accumulare e restituire energia, sono l'induttanza e il condensatore, che realizzano la funzione di base di qualsiasi oscillatore. Tuttavia entrambi possono essere sostituiti da un *cristallo di quarzo* che è in grado di svolgere una funzione simile, grazie all'effetto piezoelettrico, con il vantaggio addizionale di ottenere che l'oscillazione sia molto stabile in frequenza. Pertanto gli oscillatori a quarzo sono a frequenza fissa, e risulta necessario sostituire il *cristallo*, se si vuole variarla.

*Funzione del transistor*

Partendo dal circuito L-C fondamentale, si analizzeranno i diversi tipi di



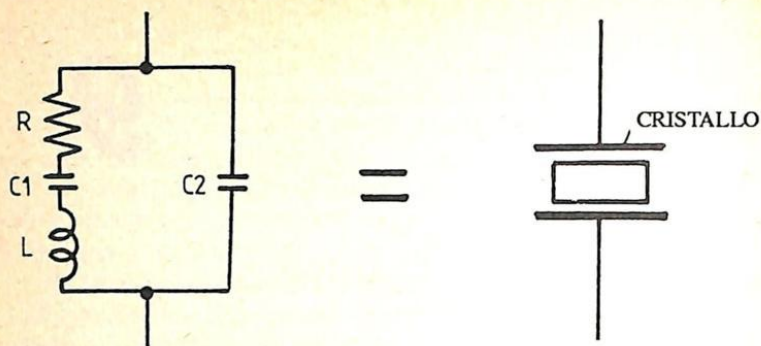


Fig. 1.-Un cristallo piezoelettrico è equivalente al circuito rappresentato.

oscillatori.

Come si vede nella figura 2, il circuito contiene un transistor  $T$ , un trasformatore TRF ed un condensatore  $C$ .

Il suo funzionamento è molto semplice: il secondario  $L2$  preleva una certa quantità di energia del circuito oscillante e la invia alla base del transistor, il quale la fornisce, amplificata, al circuito  $L1-C$ , completando il ciclo che si

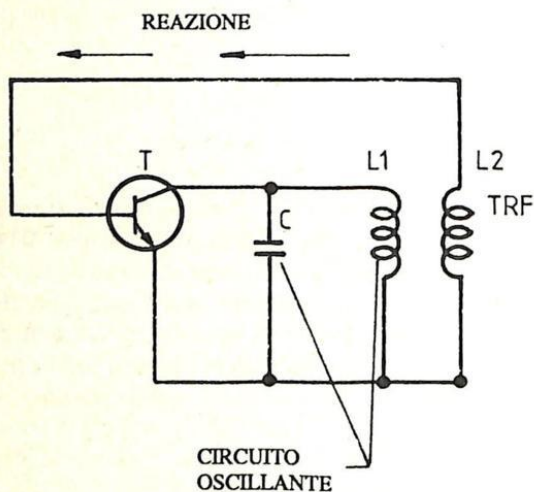


Fig. 2.-Oscillatore basato su un trasformatore con circuito oscillante sul primario.

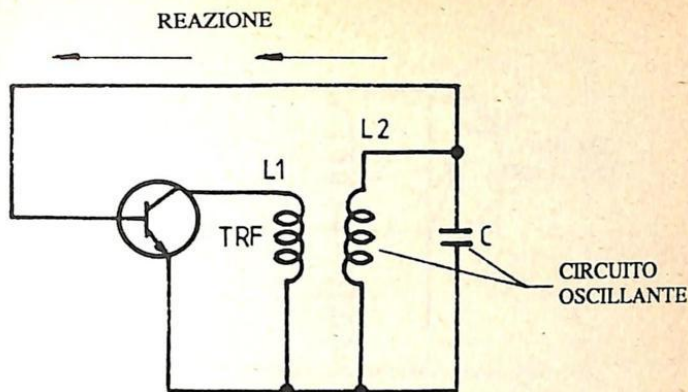


Fig. 3.-Oscillatore con trasformatore il cui circuito oscillante si trova sul secondario.

ripeterà alla stessa frequenza di oscillazione.

Un altro circuito molto simile al precedente è quello rappresentato in figura 3, nel quale il circuito oscillante è situato sul secondario, dalla parte della base. In questo caso l'apporto di energia è effettuato dal transistore attraverso il circuito del primario.

### Oscillatori classici

Oltre agli esempi precedenti, nei quali è necessaria la presenza di un trasformatore, esistono altre disposizioni in cui la frazione di segnale necessaria al transistor per mantenere l'oscillazione si ottiene senza impiegare questo elemento.

Esistono due disposizioni classiche, a partire dalle quali, e con qualche variante, si può realizzare qualsiasi tipo di oscillatore. Sono dette: oscillatore Hartley e oscillatore Colpitts.

Il primo è rappresentato in figura 4, in cui si vede solo la struttura di principio, senza tener conto degli altri componenti necessari per realizzare le polarizzazioni. Il circuito oscillante è costituito dal condensatore C e dalla somma delle induttanze L1 e L2 ed è applicato tra il collettore e la base del transistore.

Il transistore preleva la frazione di segnale che esiste su L1, tra la base e l'emettitore, che, amplificata adeguatamente, è fornita tramite il collettore,



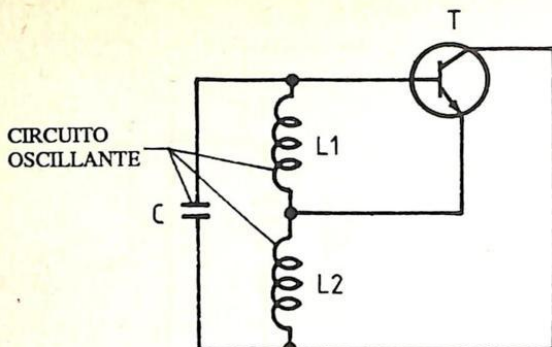


Fig. 4.-Schema di principio di un oscillatore Hartley.

completando il ciclo.

La frequenza di questo tipo di oscillatore è definita dalla seguente equazione:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L1+L2) \cdot C}}$$

### Condizioni per l'oscillazione

Occorre definire le condizioni necessarie perchè possa prodursi e mantenersi l'oscillazione, allo scopo di determinare il valore dei componenti che la rendano possibile; questa condizione è fornita dal confronto tra il quoziente dei valori delle induttanze ed il guadagno di corrente ( $\beta$ ) del transistor. L'equazione usata è la seguente:

$$\text{Condizione di mantenimento: } B \approx L1/L2.$$

Si utilizza il simbolo  $\approx$  (approssimativamente uguale) per il fatto che la condizione esatta è pressochè impossibile da precisare, poichè il guadagno di corrente ( $\beta$ ) può variare, entro certi limiti, nello stesso tipo di transistor.

L'oscillatore Colpitts è rappresentato in figura 5 che, come si può osservare, ha una struttura simile alla precedente, ma con lo scambio tra le induttanze e i condensatori.

Il circuito oscillante sarà perciò formato dalla induttanza  $L$  e dalla com-

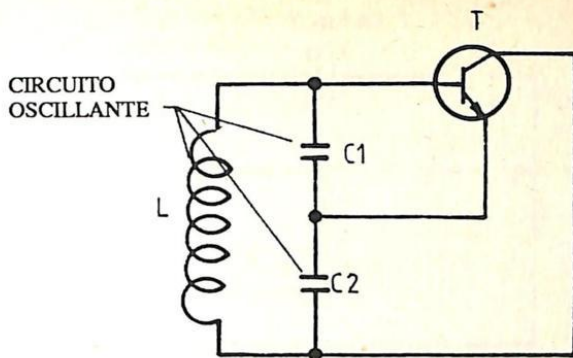


Fig. 5.-Schema di principio di un oscillatore Colpitts.

binazione in serie dei condensatori C1 e C2 (non corrisponde alla somma degli stessi), ed è ancora applicato tra il collettore e la base; il segnale da amplificare è preso sul condensatore C1.

In tale tipo di oscillatore, la frequenza ottenuta, così come la condizione di mantenimento sono definite dalle equazioni:

*Frequenza di oscillazione:*

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \cdot \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}}$$

*Condizione di mantenimento:*  $B \approx C_2/C_1$ .

### Impiego di un cristallo

La stabilità della frequenza di oscillazione può essere migliorata, in entrambi i casi, utilizzando un cristallo *piezoelettrico* come elemento di controllo, in modo che sostituisca qualcuno di quelli che formano il circuito oscillante.

Il circuito equivalente di un *cristallo* che, come si sa, è capace di vibrare ad una determinata frequenza, quando viene sottoposto a una tensione elettrica, è rappresentato in figura 1.



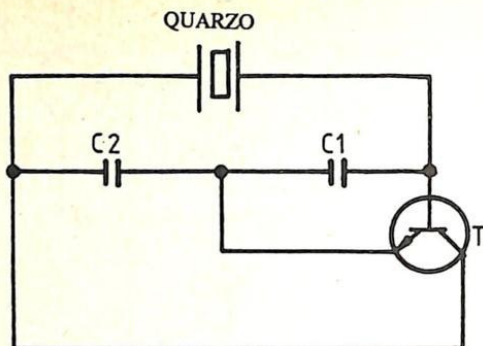


Fig. 6.-Oscillatore Colpitts in cui l'induttanza è stata sostituita con un cristallo.

Impiegando questo elemento, si possono realizzare degli oscillatori come i precedenti, utilizzandolo in sostituzione della induttanza nel tipo Colpitts, o al posto di una delle induttanze nel tipo Hartley.

### Configurazione completa

Partendo dagli schemi precedenti, si può completare la configurazione

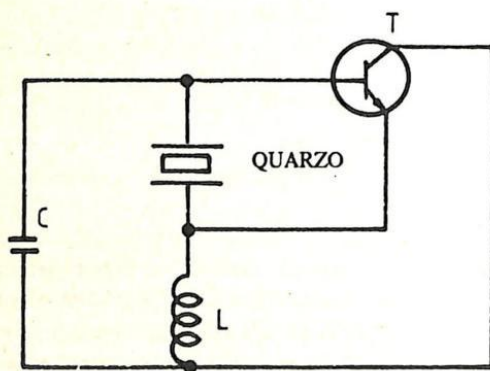


Fig. 7.-Oscillatore Hartley con un cristallo al posto di una delle induttanze.

di un circuito oscillatore, includendo i restanti elementi necessari per porre il transistor nel punto di lavoro adatto.

In figura 8 è rappresentato un oscillatore Hartley completo, nel quale i componenti del circuito oscillante sono le induttanze  $L1$  e  $L2$  ed il condensatore  $C1$ . Si osservi che sono stati aggiunti, in serie con le induttanze, i condensatori  $C2$  e  $C3$  il cui unico compito è di evitare che finisca a massa la corrente di base e collettore, rispettivamente, e che non influiscono sul funzionamento dell'oscillatore come tale.

Nella figura 9 si può vedere un oscillatore Colpitts, con il circuito oscillante costituito da  $C1$ ,  $C2$  e  $L$ . In questo caso è stato necessario utilizzare il condensatore  $C3$  per isolare le tensioni continue di collettore e base.

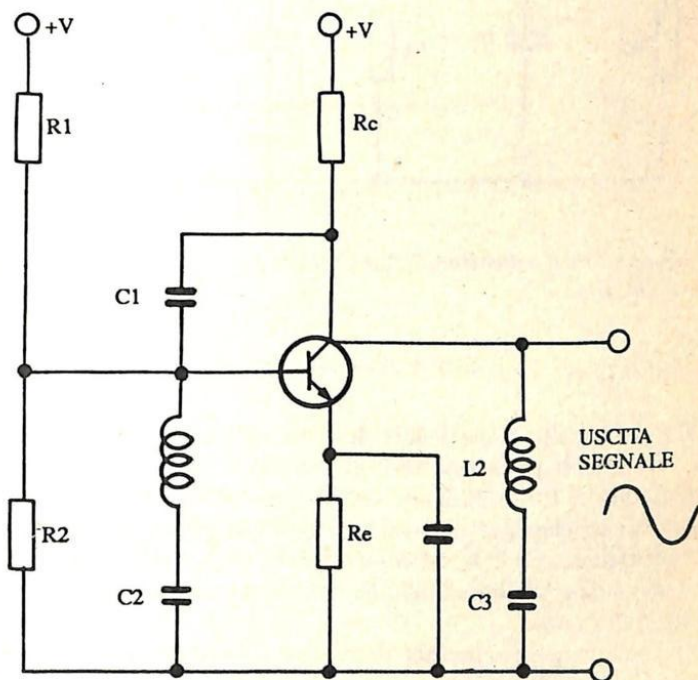


Fig. 8.-Oscillatore a transistor completo che comprende gli altri componenti necessari. E' del tipo Hartley.



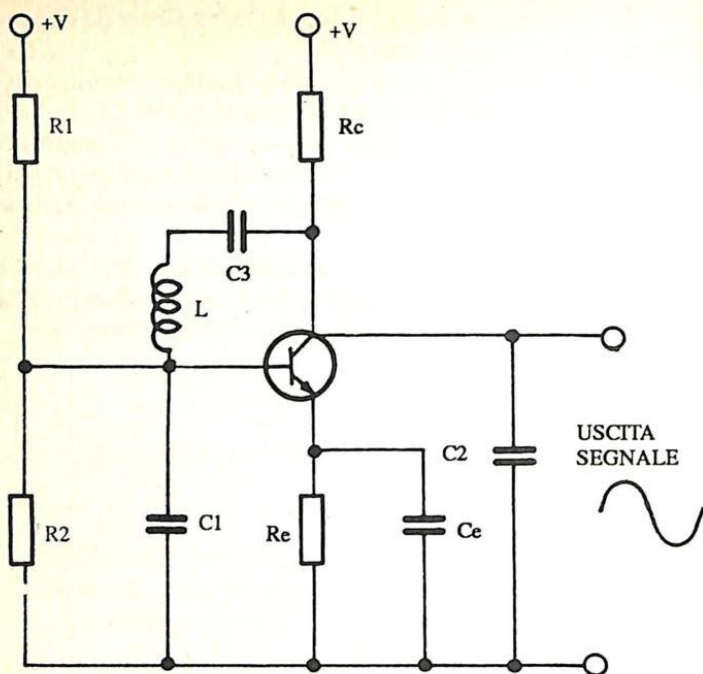


Fig. 9.-Oscillatore a transistor di tipo Colpitts con tutti i componenti per completare il circuito.

### Altri oscillatori

Oltre ai modelli di oscillatore descritti, ne esistono altri due tipi che si usano con una certa frequenza: sono gli oscillatori RC e quelli a rapporto.

L'oscillatore RC utilizza una serie di stadi, costituiti da una resistenza e un condensatore, che producono un effetto di variazione di fase, fornendo alla base un segnale con le stesse caratteristiche di fase di quello che vi esiste nello stesso momento, il quale amplificandosi e tornando agli stadi, fa che si possa ripetere il ciclo.

Occorre un numero minimo di tre stadi. La frequenza di oscillazione si calcola con l'equazione:

$$f = 1/2 \cdot \pi \cdot R \cdot C \cdot \sqrt{6 + 4 \cdot R_C/R}$$

la condizione di mantenimento sarà:

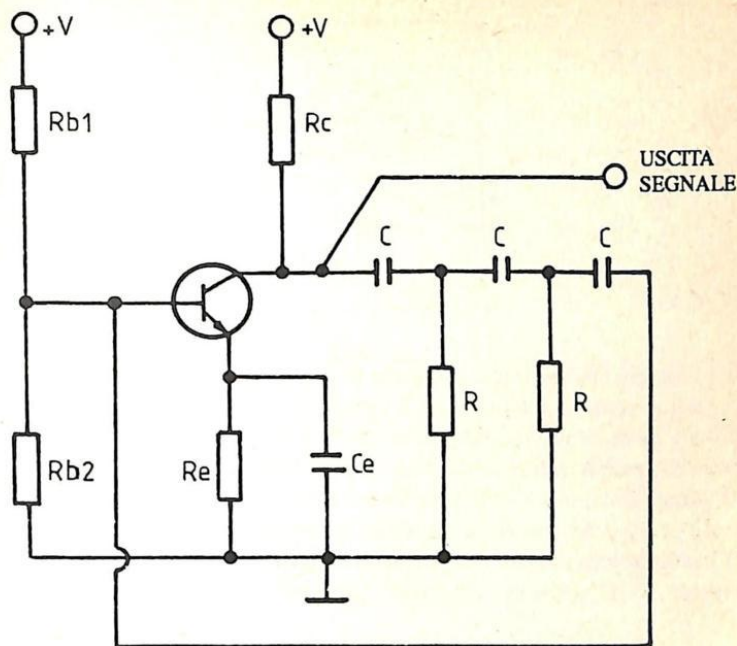


Fig. 10.-Oscillatore RC con tre stadi variatori di fase.

$$\beta > 23 + 29 \cdot R/R_C + 4 \cdot R_C/R$$

in cui  $R$  e  $C$  sono i valori degli elementi che costituiscono gli stadi, supponendoli uguali, e  $R_C$  è la resistenza di polarizzazione del collettore (Fig. 10).

Gli oscillatori a rapporto utilizzano un transistor del tipo UNIGIUNZIONE, e funzionano mediante la carica e scarica di un condensatore, il cui ciclo definisce la frequenza. La loro uscita non è sinusoidale, ma è costituita da una serie di impulsi, come si vedrà nel seguito.

### Oscillatori a rapporto

La caratteristica più rilevante di un transistor unigiunzione è quella che, attraverso il suo emettitore, non circola corrente finché la sua tensione non supera un certo valore. In tale istante l'emettitore assorbe una grande quantità di



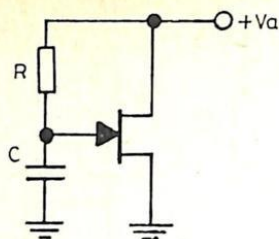


Fig. 11.-Oscillatore di principio UJT.

corrente, comportandosi come un diodo polarizzato direttamente.

Questa caratteristica fa sì che il circuito rappresentato in figura 11 possa oscillare liberamente. Quando si collega la tensione di alimentazione, il condensatore C tenderà a caricarsi tramite la resistenza R.

Durante la carica, la tensione ai suoi capi aumenterà esponenzialmente; tale tensione è quella che viene applicata all'emettitore dell'UJT.

Quando la tensione sul condensatore raggiunge quella di conduzione dell'emettitore, l'UJT inizierà a condurre, comportandosi l'emettitore stesso co-

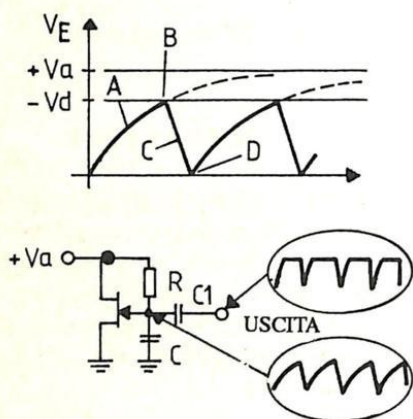


Fig. 12.-A) Il condensatore C si carica. B) La tensione di emettitore raggiunge quella di conduzione dell'UJT. C) Il condensatore C si scarica rapidamente attraverso l'emettitore. D) Il condensatore C è completamente scarico. L'UJT va in interdizione ed il ciclo ricomincia.

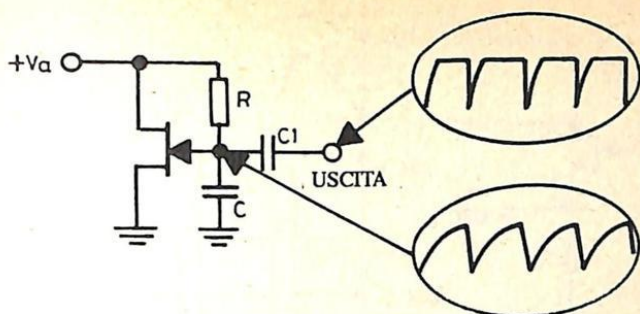


Fig. 13.-Forme d'onda sull'emettitore dell'UJT e all'uscita dell'oscillatore.

me un diodo semiconduttore, il che consente al condensatore di scaricarsi rapidamente. Quando la scarica finisce, l'UJT torna al suo stato di interruzione, in cui si trovava inizialmente, per cui il processo torna a ripetersi (Fig. 12).

### Forme d'onda

Tale funzionamento può essere utile in vari modi. Il primo di essi consiste nel raccogliere la tensione dell'emettitore tramite un secondo condensatore C1 (Fig. 13). Se il valore di C1 è quello adeguato, non trasmetterà la carica relativamente lenta del condensatore C, ma sarà attraversato dall'impulso negativo provocato dalla conduzione brusca dell'UJT.

Un altro modo di utilizzare l'oscillatore, consiste nell'includere delle resistenze in serie con le basi dell'UJT. Su di esse appariranno impulsi positivi o negativi coincidenti con l'entrata in conduzione del transistor (Fig. 14).

Il tempo di carica del condensatore dipende dal valore del rapporto intrinseco ( $\eta$ ) dell'UJT. Per il margine di valori in cui si trova di solito  $\eta$  (da 0,5 a 0,7), detto tempo oscilla tra 0,8 e 1,2 volte la costante di tempo ( $\tau$ ) del circuito RC ( $\tau = R \cdot C$ ).

Per un condensatore da  $0,1 \mu\text{F}$  e una resistenza di  $10 \text{ k}\Omega$ , la costante di tempo è:  $\tau = R \cdot C = 10^4 \cdot 10^{-7} = 10^{-3} \text{ sec.}$ , cioè il ciclo di carica durerà approssimativamente 1 msec. (tra 0,8 e 1,2 msec.).

Siccome la frequenza di ripetizione del processo è l'inverso del periodo o tempo in cui si riproduce il fenomeno, per i valori precedenti la frequenza sarà:  $f = 1/T = 1/10^{-3} = 10^3 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$ . Il circuito genera cioè impulsi con una frequenza approssimativa di 1 kHz (può variare tra 800 e 1.200 Hz, in base al valore reale di  $\eta$ ).



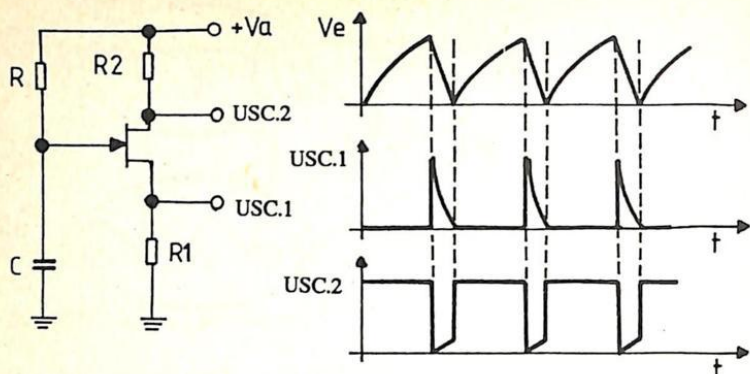


Fig. 14.-Uscite sulle basi.

### Circuiti pratici

Possono esistere altre varianti per il circuito oscillatore. Così quello rappresentato nella figura 15 permette di ottenere un'onda rettangolare con frequenza di 5,4 kHz con i valori indicati. Con quello di figura 16 si può ottenere una frequenza che dipende dalla tensione di alimentazione. Quando questa varia tra 7 e 15 V, la frequenza ottenuta va da 1 a 2,5 kHz. Infine con il circuito di figura 17 si può ottenere una frequenza variabile tra 100 Hz e 10 kHz grazie al potenziometro inserito.

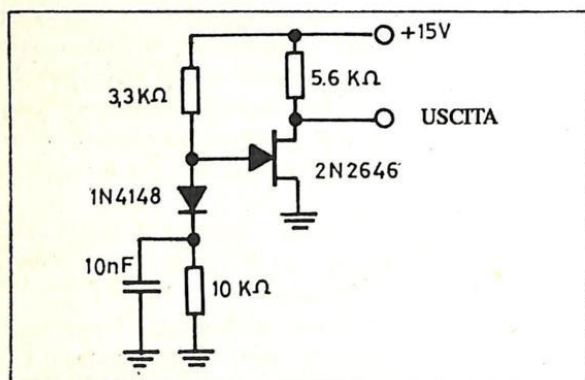


Fig. 15.-Oscillatore a 5,4 kHz.

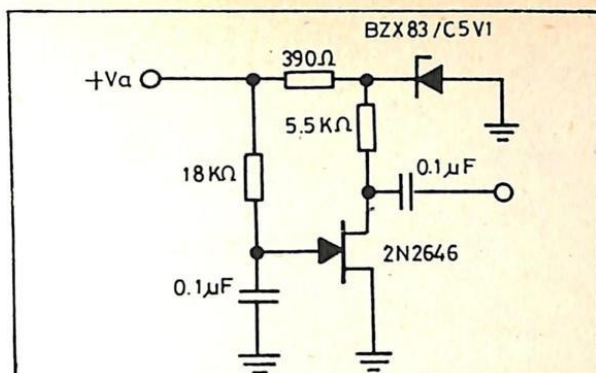


Fig. 16. - Oscillatore da 1 a 2,5 kHz

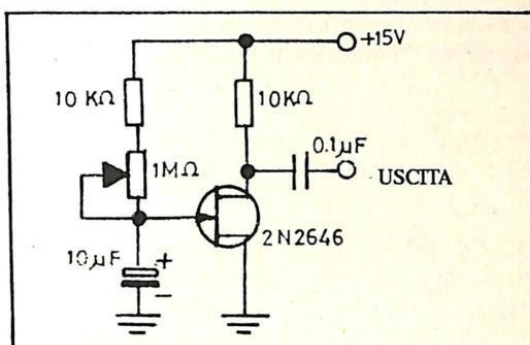
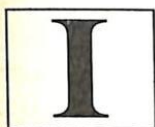


Fig. 17. - Oscillatore da 100 Hz a 10 kHz





*IL TRANSISTORE IN CAMPO DIGITALE*

Il transistor, oltre alle possibili applicazioni in campo analogico, può anche essere utilizzato come elemento di commutazione nei sistemi digitali e, di fatto, costituisce uno degli elementi fondamentali su cui si basa l'elettronica digitale, poichè tutti i circuiti logici contengono un numero più o meno elevato di questo componente.

*Caratteristiche del transistor*

Logicamente in campo digitale occorre considerare altre caratteristiche del transistor, che non erano importanti nel funzionamento analogico, come ad esempio la velocità di commutazione o rapidità nel passaggio dallo stato di interdizione a saturazione e viceversa.

Su queste influiscono le capacità proprie della giunzione del transistor, di cui ci occuperemo nel seguito.

*Funzionamento del transistor in campo digitale*

Un segnale digitale è caratterizzato dal fatto che l'informazione in esso contenuta è codificata in impulsi di tensione o di corrente, in modo che si distinguono due stati ben definiti, il livello alto, o presenza di un determinato valore di tensione o di corrente, e il livello basso, o assenza di segnale, cioè livello zero di tensione o di corrente.

In queste condizioni, durante il livello alto di segnale, il transistor si tro-



va in saturazione e, quando il segnale passa a un livello basso, il transistor è in stato di interdizione.

Il problema fondamentale in questo caso è che il dispositivo commuti il più rapidamente possibile.

Per ottenere tale rapidità, è necessario minimizzare il valore del condensatore che costituisce la giunzione collettore-base, poichè, in funzione del numero di cariche che si accumulano in essa, occorrerà più o meno tempo per far sì che escano dalla giunzione, passando dallo stato di interdizione a quello di saturazione, o che entrino nella stessa quando si passa da saturazione a interdizione.

A questo scopo sono stati progettati transistori di commutazione a bassa capacità, come i Schottky, basati su particolari tipi di giunzione tra metalli e semiconduttori, o con incorporato un condensatore addizionale disposto in modo da diminuire l'effetto della capacità collettore-base.

## *Logica positiva e negativa*

Sia l'analisi che la sintesi dei circuiti digitali sono basate sugli studi nel campo della logica, dovuti al matematico inglese George Boole, pubblicati nel 1937 nell'opera intitolata *Analisi matematica della logica*. Nei suoi studi, si occupa sostanzialmente di assegnare una forma simbolica ai processi di ragionamento, per poter in seguito manipolare detti simboli mediante una struttura matematica appropriata.

Stabilite le basi teoriche di tali strutture, si può procedere all'elaborazione pratica di circuiti che ne simulino il funzionamento. Allora tutto il processo di elaborazione dei circuiti si riduce a scegliere dei concetti adatti, che in definitiva si riducono al *si* e *no* logici, e che elettronicamente si possono rappresentare con presenza o assenza di tensione, ad esempio, all'uscita di un circuito.

Si distinguono quindi due modi complementari che si riferiscono alla rappresentazione di assenza o presenza di segnale, e vengono definiti *logica positiva* e *negativa*.

In logica positiva viene indicato *uno* o livello alto, la presenza di tensione in uscita, e attribuisce lo *zero* o livello basso, all'assenza di tensione. Al contrario la logica negativa si riferisce alla presenza di tensione con uno *zero*, ed all'assenza con *uno*.

Quando si inizia il progetto di un circuito digitale, si deve perciò scegliere preliminarmente la logica con cui vuole lavorare, per poter applicare le relazioni appropriate che permetteranno di determinare i circuiti da impiegare, e il modo di utilizzarli.

## Stati di interdizione e saturazione

Ciò che caratterizza il funzionamento di un transistor in campo digitale, è la rapidità di passaggio dallo stato di interdizione a quello di saturazione e viceversa.

Lo stato di interdizione è prodotto nell'elemento attivo quando la giunzione base-emettitore non è polarizzata in modo sufficiente da entrare in conduzione (la situazione corrisponde tipicamente ad una tensione base-emettitore minore di 0,2 V).

Questa situazione impedisce il passaggio di una corrente attraverso i terminali di uscita, per cui la tensione su questi terminali è obbligatoriamente quella di alimentazione, non circolando attraverso la resistenza di carico alcuna corrente. In questo caso, utilizzando la logica positiva, si dice che in uscita esiste un *uno*.

Il processo di saturazione è l'opposto del caso precedente (una corrente di base elevata). La giunzione base-emettitore conduce a un livello tale che la tensione collettore-emettitore varia molto poco quando varia molto la corrente di collettore. In questo caso chi controlla la corrente di collettore non è l'elemento attivo, ma il valore della resistenza di carico, per cui l'equazione del funzionamento in zona attiva ( $I_C = \beta \cdot I_B$ ) non è valida in queste condizioni, ma tale corrente è funzione della tensione di alimentazione e, come è stato detto prima, del valore della resistenza di carico.

In questo caso si dice che all'uscita del circuito esiste uno *zero* (in logi-

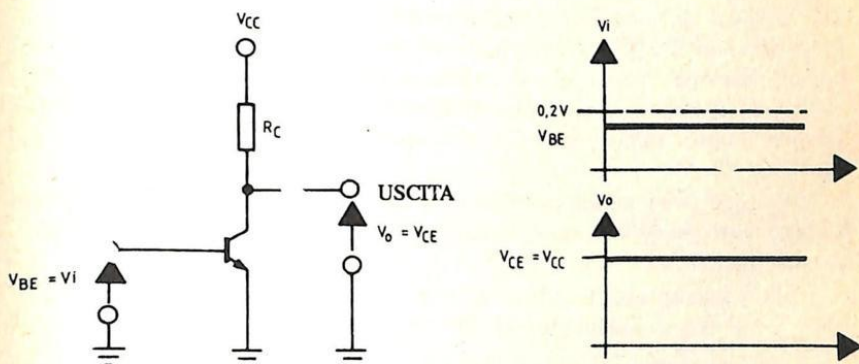


Fig. 1.-Stato di interdizione di un transistor in configurazione ad emettitore comune. Se la tensione di ingresso si mantiene inferiore a 0,2 V, l'uscita presenta una tensione uguale a quella di alimentazione.



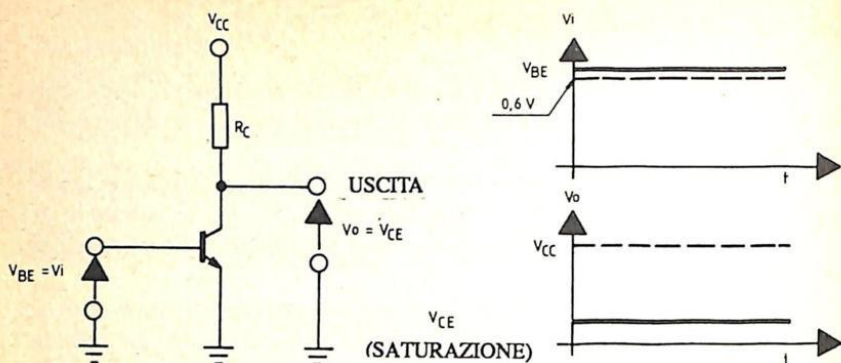


Fig. 2.-Stato di saturazione. Si consegue quando la tensione di ingresso supera la soglia di 0,6 V, per la quale il transistor presenta sul collettore una tensione di circa 0,2 V.

ca positiva). Se invece della logica positiva si usa quella negativa, si inverte la denominazione degli stati (quando c'è tensione in uscita si dice che esiste uno zero, e quando la tensione è nulla un uno).

### Funzionamento come commutatore

Quando un transistor deve funzionare come commutatore pilotato da un segnale digitale, la circuiteria annessa, che costituisce il montaggio richiesto, sarà orientata, in ogni caso, per agire sul transistor facendolo passare dallo stato di interdizione a quello di saturazione o viceversa. Per comprendere la filosofia di funzionamento si può commentare brevemente un semplice esempio.

Consideriamo allora ciò che in elettronica digitale si chiama porta NAND, corrispondente alla tecnologia TTL (logica transistor-transistore), con due ingressi.

Il suo funzionamento si basa sul fatto che quando compare su tutti gli ingressi un segnale a livello alto, si abbia in uscita un segnale a livello basso, mentre quando esiste almeno un ingresso a livello basso, si ottenga in uscita un segnale a livello alto.

Esistono naturalmente anche altri tipi di porte come la NOR, la OR, la AND, ecc. Tutte queste configurazioni sono destinate a funzionare con impulsi, e ciascuna di loro attua una specifica funzione.

Su esse si basano tutti i componenti digitali, da qualsiasi semplice circuito logico, il cui compito può essere quello di controllo o commutazione, fino a quelli elementari di qualsiasi elaboratore.

### *Circuito monostabile a transistore*

Un circuito monostabile è quello che, in funzione di una certa eccitazione al suo ingresso (impulso, onda quadra, ecc.), risponde con un segnale a forma di impulso in uscita, la cui durata dipende solo dai componenti del circuito.

Per tale circuito è indispensabile l'impiego di un transistor, così come di qualche altro componente che controlli la durata dell'impulso, come un condensatore.

### *Circuito fondamentale*

Il circuito più elementare di un monostabile è visibile in figura 3.

Supponiamo che TRT1 sia saturato. La sua tensione di collettore è praticamente uguale a quella di emettitore (collegato a massa), per cui manterrà TRT2 interdetto. Il condensatore C1 sarà caricato con una tensione approssimativamente uguale a quella di alimentazione.

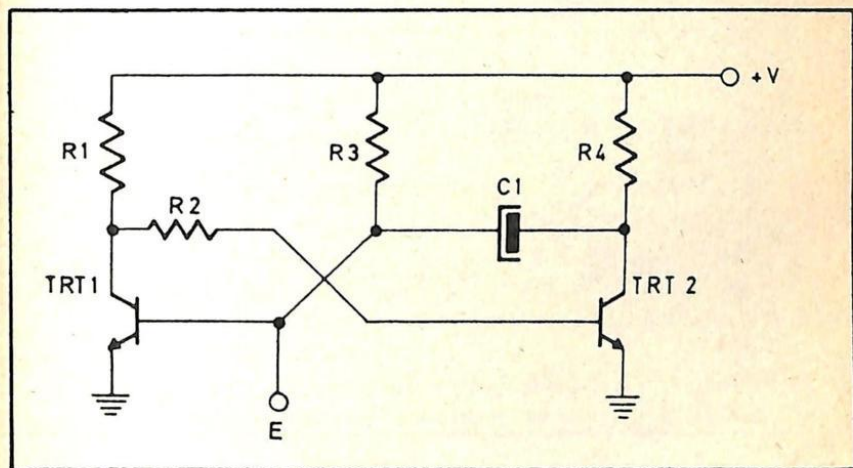


*Fig. 3.-Circuito di principio del monostabile.*



In questa situazione il circuito può rimanere per un tempo indefinito; pertanto è in situazione stabile.

Quando si applica un impulso negativo all'ingresso E, il transistor TRT1 tenderà ad amplificarlo, per cui apparirà sul suo collettore, invertito di segno (impulso positivo). Tale impulso è inviato, tramite R2, alla base di TRT2 che lo amplificherà e invertirà di nuovo, facendolo comparire sul suo collettore come impulso negativo.

Come si può vedere, la condizione a cui tenderà il circuito è che TRT1 vada in interdizione, e TRT2 si saturi (Fig. 4). Però nel circuito esiste C1 che non ha potuto scaricarsi durante il processo, data la rapidità con cui si produce.

### *Lo stato semistabile*

Si osservi che essendo TRT2 saturato, il terminale positivo di C1 è virtualmente connesso a massa ( $V_{CE}=0$ ), per cui tenderà a caricarsi tramite R3 fino ad una tensione uguale a quella di alimentazione (con polarità cambiata sui suoi terminali).

Questo processo presuppone che, prima, si scarichi fino a che la tensione ai suoi capi sia nulla, per poi cominciare a ricaricarsi in senso opposto. Poi-

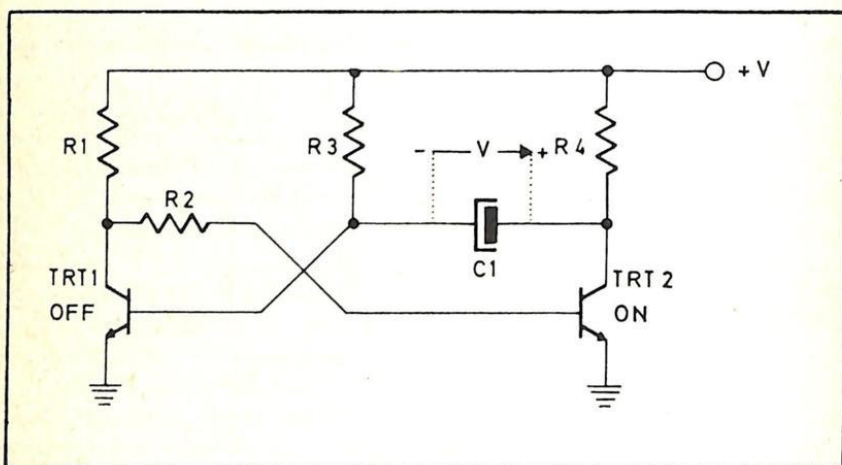


Fig. 4.-Situazione di TRT1 e TRT2 durante lo stato semistabile, con il condensatore C1 caricato.

chè però il terminale negativo di C1 è collegato alla base di TRT1, quando la tensione sul condensatore si annulla e comincia a diventare di segno opposto, il transistor TRT1 comincerà a condurre (raggiungendo la sua base un potenziale positivo rispetto all'emettitore, collegato a massa).

Questo farà sì che sul collettore compaia una diminuzione di tensione (amplificazione e inversione), che sarà inviata a TRT2, iniziando un nuovo processo in senso opposto al precedente, che terminerà con TRT1 saturato e TRT2 interdetto.

Come si può vedere, il secondo stato del circuito presentato (TRT1=OFF, TRT2=ON) *non è stabile indefinitamente*, ma solo durante un certo tempo, che si può calcolare, approssimativamente, con l'equazione:

$$T = 0,7 \cdot C1 \cdot R3$$

in modo che T sia in millisecondi (msec), quando C1 è in microfarad ( $\mu F$ ) e R3 in kilohm ( $k\Omega$ ). Così, ad esempio, per  $C1=10 \mu F$  e  $R3=150 k\Omega$ , T vale:

$$T = 0,7 \cdot 10 \cdot 150 = 150 \text{ msec} \approx 1 \text{ sec}$$

Pertanto, il circuito di figura 3 ha un *solo* stato stabile, da cui deriva il suo nome: monostabile. Esiste inoltre l'interessante proprietà, che il tempo in cui permane nel suo stato semistabile dipende solo dai valori assegnati ai componenti del circuito.

### *Migliorie al circuito*

Si possono aggiungere alcuni elementi che migliorino certi aspetti del funzionamento del circuito base.

Nella figura 5 ne sono mostrati alcuni.

Il condensatore C2 serve ad accelerare la transizione dallo stato stabile al semistabile; il circuito monostabile può essere innescato con impulsi o tensioni *negative*, applicati all'ingresso E1 o anche con impulsi o tensioni *positive* applicati a E2. A ciò collaborano le reti C3-R5-D1 e C4-R6-D2, rispettivamente.

Un'altra miglioria che si può ottenere, è visibile nel circuito di figura 6, nel quale l'accoppiamento tra i transistori avviene tramite i rispettivi emettitori.

Nello stato stabile TRT1 è interdetto e TRT2 in saturazione. Applicando un impulso *positivo* all'ingresso E, il monostabile entra nello stato semistabi-



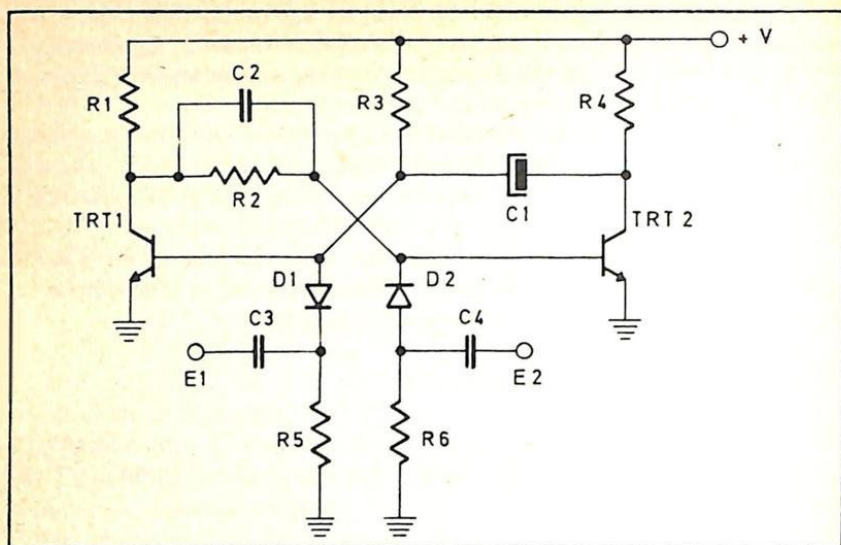


Fig. 5.-Circuito monostabile completo con inclusa una serie di miglie.

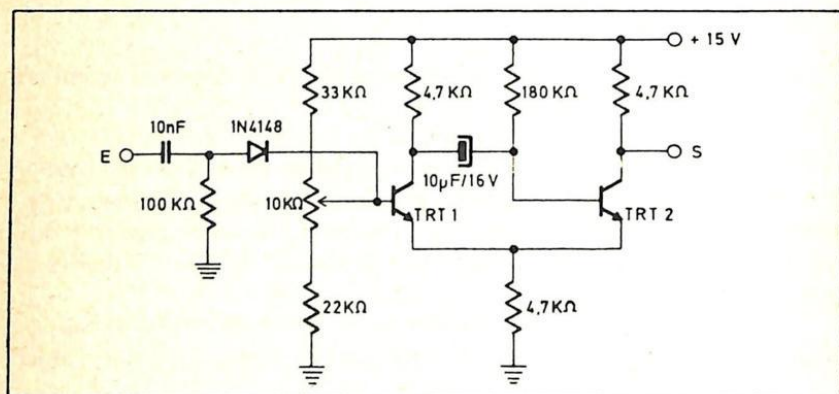


Fig. 6.-Circuito monostabile accoppiato tramite gli emettitori dei transistori.

le, con TRT1 in conduzione (non in saturazione) e TRT2 interdetto. Il condensatore C1 agisce in modo simile a quello dei casi precedenti, facendo tornare il circuito al suo stato iniziale.

La novità di questo circuito, a parte la sua diversa configurazione, consiste nel fatto che, grazie al potenziometro R1, si può variare la durata dello stato semistabile tra 200 msec e 1 sec, con i valori dei componenti indicati nello schema, in dipendenza della posizione in cui si trova il cursore, se nella zona inferiore o superiore, rispettivamente.

Si può utilizzare qualsiasi tipo di transistor al silicio ad alto guadagno (BC147, BC237, BC557), ottenendo all'uscita S un impulso positivo di circa 7 V di ampiezza (livello superiore dell'impulso in 15 V). La variazione nella durata dello stato semistabile è approssimativamente lineare con la resistenza R1.

## *Multivibratori astabili a transistori*

Con il multivibratore astabile si ottiene un vero circuito oscillatore a transistori, ma con la particolarità che il segnale ottenuto è quadrato, come deve essere per qualsiasi circuito che lavori in campo digitale.

## *Teoria*

Se si aggiunge un secondo condensatore a un monostabile, così come mostra la figura 7, il circuito possiederà *due* stati semistabili (uguali a quello del monostabile).

Ciò significa che nessuno dei due stati possibili del circuito è stabile indefinitamente, ma che lo è solo temporaneamente.

Questo è il motivo per cui il circuito riceve il nome di *astabile* (da -a-, che indica negazione e -stabile-).

Il funzionamento del circuito è molto simile a quello già descritto per il monostabile, e consiste fondamentalmente nel fatto che il transistor TRT1 si mantiene interdetto, durante il tempo in cui C2 si scarica attraverso R3, rimanendo TRT2 saturato.

Il circuito permane in tale stato durante un tempo dato, approssimativamente, dall'espressione:

$$t_1 = 0,7 \cdot C2 \cdot R3$$

Trascorso questo tempo, il circuito cambia, in modo che TRT1 entra in



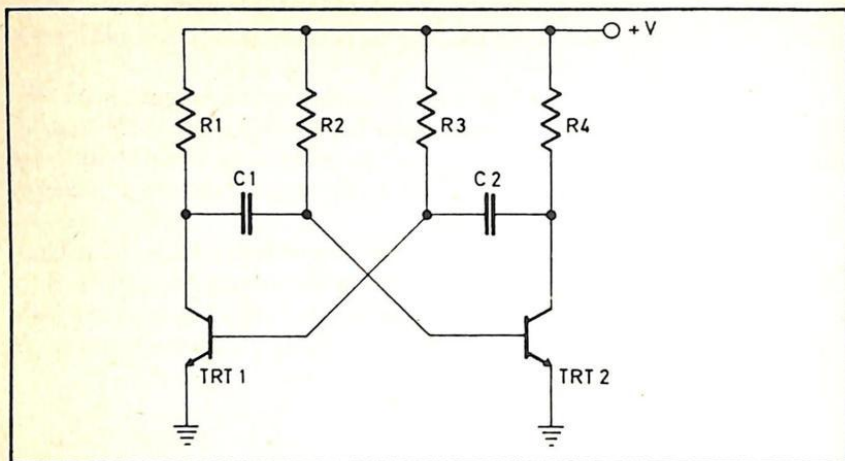


Fig. 7.-Circuito di principio del multivibratore astabile.

saturatione e TRT2 in interdizione.

Allora è l'insieme C1-R2 che influisce sulla durata del nuovo stato, con tale tempo espresso da:

$$t_2 = 0,7 \cdot C1 \cdot R2$$

in modo che, nuovamente, il circuito cambierà tornando allo stato precedente.

Il processo si ripeterà indefinitamente, e si otterranno sui collettori dei due transistori le forme d'onda mostrate in figura 8. Si osservi che i due tempi che intervengono nel processo, non hanno motivo di essere uguali.

Se si rendono uguali i valori di C1 e C2 e lo stesso accade per R2 e R3, allora  $t_1$  e  $t_2$  saranno uguali e le onde ottenute sui collettori saranno *quadre* (ugual durata dello stato alto e di quello basso); la loro frequenza potrà essere calcolata (sono uguali, benchè complementari) con l'espressione:

$$f = \frac{0,7}{R \cdot C}$$

con R valore ohmico di R2 o R3 e C capacità di C1 o C2.

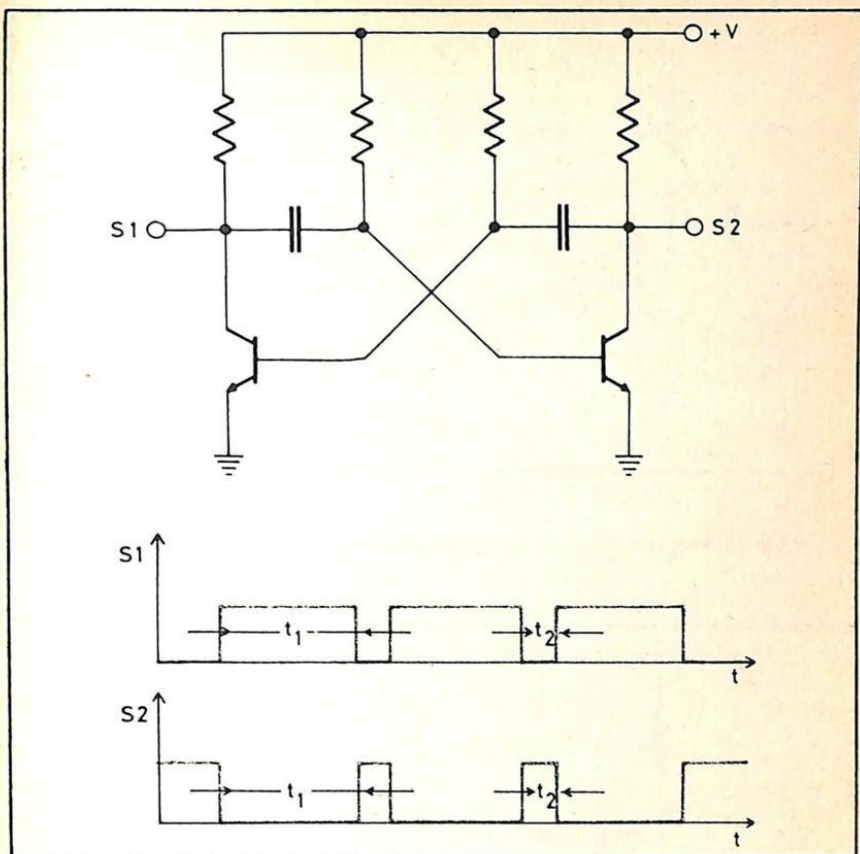


Fig. 8.-Forme d'onda ottenute sulle due uscite del multivibratore.

## Modifiche

Il circuito di principio presentato è molto sicuro e regolare nel suo funzionamento, nonostante la sua estrema semplicità. In generale, quando occorre un multivibratore, è per utilizzarne le sue forme d'onda per qualche applicazione pratica (ad esempio accendere e spegnere luci, funzionare da comando per qualche altro tipo di circuito, ecc.).

Benchè in molti casi la tensione di comando per tali apparecchiature si possa prelevare direttamente dai collettori (punti  $S1$  e  $S2$  della figura 2), in al-



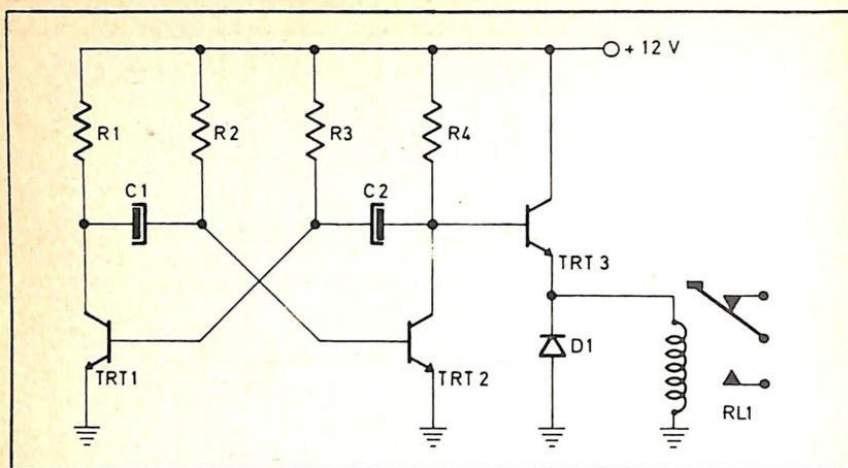


Fig. 9.-Multivibratore astabile la cui uscita comanda un relè con un contatto commutato.

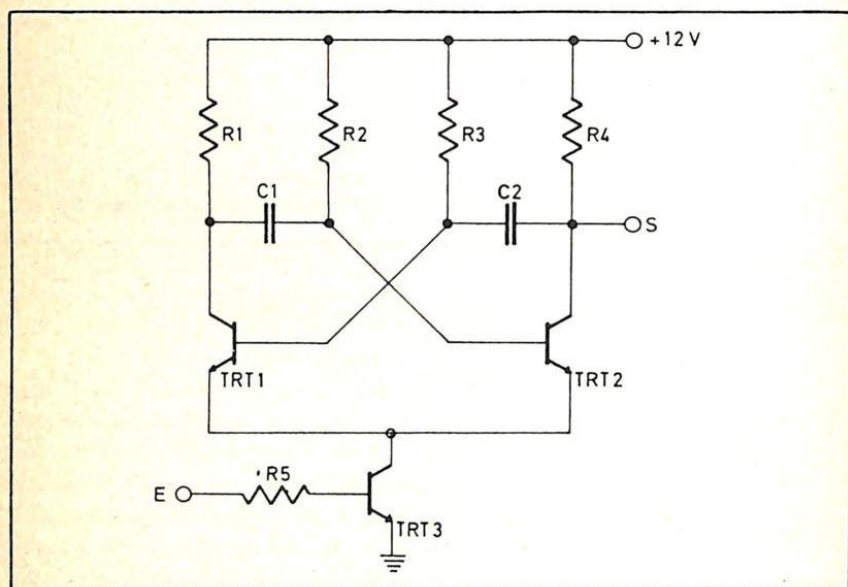


Fig. 10.-Multivibratore astabile che include l'ingresso E destinato al controllo dell'oscillazione.

tre occasioni non è possibile farlo.

Nella figura 9 è visibile un circuito che comanda un relè, i contatti del quale possono, a loro volta, servire per comandare qualsiasi segnale. Con i valori indicati, i contatti rimarranno chiusi mezzo secondo e aperti un altro mezzo secondo in cicli ripetitivi.

Con il circuito di figura 10 si può comandare l'oscillazione del multivibratore per mezzo di un segnale digitale applicato all'ingresso E. Quando tale segnale è 0 il circuito *non* oscilla, mentre quando si applica un 1 il multivibratore fornisce all'uscita S un'onda quadra di 1kHz.





*Se hai l'esigenza di conoscere per costruire tutto sull'elettronica, il Gruppo Editoriale Jackson ti propone i nuovi:*

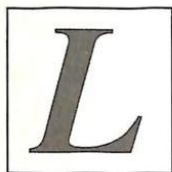
**"Libri di Base Elettronica",**

*20 preziose guide attraverso circuiti, componenti, grafici, fotografie e soprattutto innumerevoli idee per scatenare la tua fantasia con progetti collaudati e di immediata realizzazione.*

DELLA STESSA COLLANA FANNO PARTE :

- E1 - ELETTRONICA IN AUTO
- E2 - LABORATORIO
- E3 - AMPLIFICATORI OPERAZIONALI
- E4 - VIDEOREGISTRATORI
- E5 - REALIZZAZIONI PRATICHE
- E6 - COMPONENTI DI BASE
- E7 - ANTENNE CENTRALIZZATE
- E8 - COMANDI A DISTANZA
- E9 - SEMICONDUTTORI
- E10 - MOTORINI ELETTRICI
- E11 - STRUMENTI DI MISURA
- E12 - TECNICHE PRATICHE PER L'HOBBISTA
- E13 - USO DELL'OSCILLOSCOPIO
- E14 - ANTENNE RICEVENTI E TRASMITTENTI
- E15 - CIRCUITI INTEGRATI
- E16 - ELETTRONICA DI POTENZA
- E17 - MICROPROCESSORI
- E18 - ELETTRONICA E MEDICINA
- E19 - APPARECCHIATURE HI - FI
- E20 - ROBOTICA





*L'*importanza dei semiconduttori è attualmente ben nota, poichè su di essi si basa tutta l'elettronica. Per tale motivo, in questo libro cerchiamo di addentrarci in questo mondo tanto appassionante, base dello sviluppo dei circuiti integrati miniaturizzati. Grazie ai transistori ed agli altri dispositivi semiconduttori, si è riusciti ad ottenere apparecchiature molto sofisticate, impensabili fino a pochissimi anni fa.

*Questi piccoli dispositivi a base di germanio, silicio e arseniuro di gallio, non solo sostituiscono vantaggiosamente le vecchie valvole e i tubi a vuoto, ma inoltre aprono nuove ed affascinanti possibilità per nuove applicazioni tecniche.*

*Un altro grande vantaggio è che, grazie alle caratteristiche che possiedono, possono essere usati in modi molto diversi e sempre con la massima affidabilità e precisione.*

*In questo libro tratteremo dei diodi, dei transistori, dei tiristori, dei triac, dei diac, ecc., comprendendo un piccolo viaggio nel mondo delle applicazioni di alcuni di loro. Vi invitiamo a leggerlo con il maggior interesse possibile, sperando di non deludervi.*